

(11)Publication number : 2002-209854
(43)Date of publication of application : 30.07.2002

(51)Int.Cl.

A61B 3/10

(21)Application number : 2001-119086

(71)Applicant : TOPCON CORP

(22)Date of filing : 18.04.2001

(72)Inventor : HIROHARA YOKO
MIHASHI TOSHIBUMI
MAEDA NAOYUKI

(30)Priority

Priority number : 2000318559
2000350659

Priority date : 18.10.2000
17.11.2000

Priority country : JP

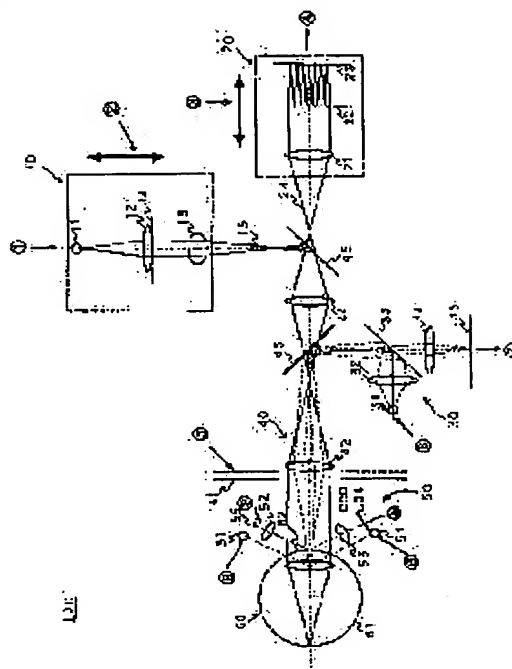
JP

(54) OPTICAL CHARACTERISTICS MEASURING INSTRUMENT

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To collectively or selectively display image data and/or numerical data corresponding to measured data and a measuring result.

SOLUTION: This optical characteristics measuring instrument 100 measures and displays e.g. the optical characteristics of an eye to be measured 60 being an object. A first illumination optical system 10 includes a first light source part 11 for illuminating the eye 60 with the luminous flux of a prescribed pattern. A first photodetective optical system 20 includes a first photodetective part 23 for photodetecting reflected light from the eye 60. A transmission/ reception light optical system 30 is used mainly for performing align adjustment and includes a second photodetection part 35 for photodetecting the reflected light from the eye 60. A common optical system 40 is arranged on the optical axis of the luminous flux emitted from the system 10 and is included in the system 10, the system 20 and the system 34 in common. An arithmetic part calculates a photodetective signal from the part 23 and the part 35. A display part graphically displays the measured data and the measuring result.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2002-209854
(P2002-209854A)

(43) 公開日 平成14年7月30日 (2002.7.30)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード* (参考)
A 6 1 B 3/10		A 6 1 B 3/10	Z H M R

審査請求 未請求 請求項の数21 O L (全 28 頁)

(21) 出願番号 特願2001-119086 (P2001-119086)
(22) 出願日 平成13年4月18日 (2001.4.18)
(31) 優先権主張番号 特願2000-318559 (P2000-318559)
(32) 優先日 平成12年10月18日 (2000.10.18)
(33) 優先権主張国 日本 (J P)
(31) 優先権主張番号 特願2000-350659 (P2000-350659)
(32) 優先日 平成12年11月17日 (2000.11.17)
(33) 優先権主張国 日本 (J P)

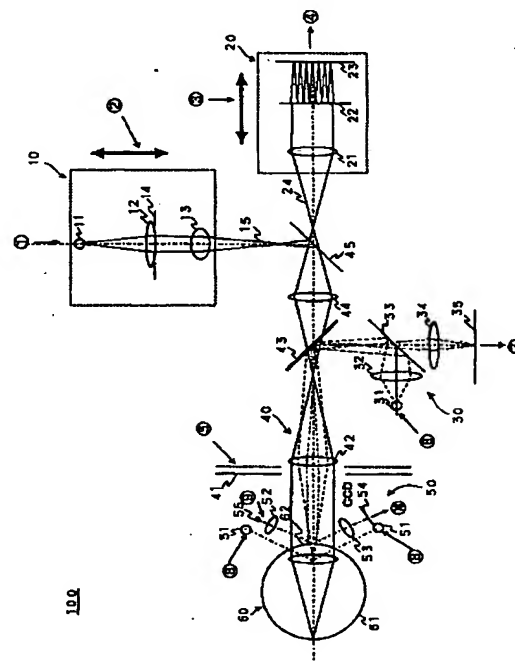
(71) 出願人 000220343
株式会社トプコン
東京都板橋区蓮沼町75番1号
(72) 発明者 広原 陽子
東京都板橋区蓮沼町75番1号 株式会社ト
プコン内
(72) 発明者 三橋 俊文
東京都板橋区蓮沼町75番1号 株式会社ト
プコン内
(72) 発明者 前田 直之
大阪府吹田市山田丘2-2 大阪大学医学
部眼科内
(74) 代理人 100107010
弁理士 橋爪 健

(54) 【発明の名称】 光学特性測定装置

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 測定データ、測定結果に対応する画像データ及び／又は数値データをまとめて、又は、選択的に表示する。

【解決手段】 光学特性測定装置100は、例えば、対象物である被測定眼60の光学特性を測定・表示する装置である。第1照明光学系10は、被測定眼60に所定パターンの光束を照射する第1光源部11を含む。第1受光光学系20は、被測定眼60からの反射光を受光する第1受光部23を含む。送受光光学系30は、アライメント調整を主に行うものであって、被測定眼60からの反射光を受光する第2受光部35を含む。共通光学系40は、第1照明光学系10から発せられる光束の光軸上に配され、第1照明光学系10、第1受光光学系20及び送受光光学系30に共通に含まれる。演算部は、第1受光部23及び第2受光部35からの受光信号に基づき演算を行う。表示部は、測定データと測定結果とをグラフィック表示する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】被測定眼に所定パターンの光束を照射する光源部を含む照射光学系と、

被測定眼からの反射光を受光する受光部を含む受光光学系と、

上記受光部からの測定データを示す受光信号に基づき、測定結果をグラフィック表示となるように演算する演算部と、

上記受光信号に基づいた測定データと、上記演算部で求められた測定結果とを、グラフィック表示する表示部とを備えた光学特性測定装置。

【請求項 2】上記演算部は、上記受光信号に基づき、複数の条件下での測定結果をグラフィック表示となるように演算し、

上記表示部は、複数の測定条件下での受光信号に基づいた測定データと、該演算部で求められた測定結果とを、グラフィック表示するようにした請求項 1 に記載の光学特性測定装置。

【請求項 3】上記表示部は、測定者の操作に応じて、複数の測定条件下での受光信号に基づいた測定データ、及び、上記演算部で求められた測定結果のグラフィック表示を選択的に表示するようにした請求項 1 又は 2 に記載の光学特性測定装置。

【請求項 4】測定者が操作を行うためのマウス等のポインティングデバイスをさらに備え、

上記演算部は、複数の条件下での測定結果を示す数値データをさらに演算し、

上記表示部は、複数の条件下での該数値データを一覧としてさらに表示し、

上記測定者が、上記表示部の表示上で、いずれかの測定条件の数値データを選択した場合、選択された数値データに対応した測定データ、及び、該測定データに基づいた測定結果をグラフィック表示するようにした請求項 1 乃至 3 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 5】上記演算部は、複数の条件として明所時又は暗所時とし、被測定眼に含まれる測定領域を明所時又は暗所時における瞳孔の大きさに対応した領域として、測定結果をグラフィック表示となるように演算するようにした請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 6】上記グラフィック表示は、収差を平面又は立体的に表した収差図、MTF を二次元又は所定の軸方向の断面、又は、x 方向・y 方向・その平均のうちいずれかひとつ又は複数の断面で示した図、PSF を平面又は立体として示した図及び数種類の視力に対応したランドルト環のいずれか一つであるようにした請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 7】上記複数の測定条件は、少なくとも上記受光信号が被測定眼での測定範囲を変更することにより決定され、

上記表示部は、測定者の操作に応じて、複数の測定条件下における測定範囲に対応させて、受光信号に基づく測定データ及び演算部で求められた測定結果についてグラフィック表示を行うようにした請求項 1 乃至 6 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 8】上記照明光学系は、被測定眼の眼底に点光源を形成し、

上記受光光学系は、被測定眼からの反射光を複数の光束に分割するハルトマン板を含み、上記受光部からの受光信号は、ハルトマン像を示し、

上記測定結果をグラフィック表示したものは、被測定眼の光学特性であるようにした請求項 1 乃至 7 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 9】上記ハルトマン像に含まれる点の参照格子点を、収差図にオーバーレイ表示するようにした請求項 8 に記載の光学特性測定装置。

【請求項 10】上記照明光学系は、被測定眼の角膜に対して異なる径のリング状光束を照射し、

上記受光光学系は、被測定眼の角膜からの反射光を受光し、

上記受光部からの受光信号は、ブラチドリリング像を示し、

上記測定結果をグラフィック表示したものは、被測定眼の角膜の形状であるようにした請求項 1 乃至 9 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 11】上記受光光学系は、被測定眼の前眼部の像を受光する第 2 受光部をさらに含み、

上記表示部は、前眼部の像に重畳して、上記測定結果をグラフィック表示するようにした請求項 1 乃至 10 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 12】上記表示部は、ハルトマン像の測定結果の基礎となる重心位置又はその変位を示すようにした請求項 1 乃至 10 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 13】上記表示部は、参照格子点とハルトマン像の重ね合わせを表示するようにした請求項 1 乃至 10 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 14】上記演算部は、被検眼の光学特性と角膜の光学特性に基づき、眼内収差を演算し、

上記表示部は、眼内収差を表示するようにした請求項 1 乃至 10 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 15】上記演算部は、角膜収差を演算し、上記表示部は、角膜収差を表示するようにした請求項 1 乃至 10 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 16】上記演算部は、ゼルニケ係数を演算し、これに基づき被測定眼の全収差又は高次収差を演算し、上記表示部は、演算部で求められた被測定眼の全収差又は高次収差を表示するようにした請求項 1 乃至 10 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 17】上記グラフィック表示は、撮影した生画像であるハルトマン像と、少なくとも 2 次以上の収差を

含む被検眼の全収差と、3 次以上の収差を含む高次収差とを表示するようにした請求項 1乃至 10 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 18】上記グラフィック表示は、ハルトマン像と、3 次以上の複数の収差を含む全高次収差と、全高次収差に含まれる各高次収差を対称収差と非対称収差とに分けて表示するようにした請求項 1乃至 10、17 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 19】上記グラフィック表示は、ハルトマン像と、3 次以上の複数の収差を含む全高次収差と、全高次収差に含まれる各高次収差をそれぞれ個別に表示するようにした請求項 1乃至 10、17 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 20】上記グラフィック表示には、さらに高次収差、又は、少なくとも 2 次以上の全収差から算出した点像強度分布を表示するようにした請求項 17乃至 19 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【請求項 21】上記グラフィック表示は、ブラチド像と、少なくとも 2 次以上の収差を含む被検眼の全収差と、3 次以上の収差を含む高次収差とを表示するようにした請求項 1乃至 10 のいずれかに記載の光学特性測定装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光学特性測定装置に係り、特に、複数の条件下での測定による各種データをグラフィック表示する光学特性測定装置に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、医学用に用いられる光学機器は、極めて多種多様な広がりを見せている。この光学機器は、特に、眼科では、眼の屈折力、調節等の眼機能、眼球内部の検査を行う光学特性測定装置として普及している。また、これらの各種検査の測定結果は、例えば、検査対象となる患者の被測定眼がどのような測定条件下に置かれていたかが重要となる。例えば、眼の瞳孔は、明るい所では小さく、暗い所では大きくなるため、測定条件として、照度も考慮する必要があり、さらに、被測定眼の測定範囲も重要である。

【0003】また、眼に含まれる網膜、角膜、それ以外の部位の形状は、患者によってそれぞれ特有なものである場合が多く、眼科医等が患者の被測定眼に対する診断等を迅速に行うためには、被測定眼の各部位に関する収差等の各種データを、まとめて、又は、所望のデータを選択して表示することが望ましい。これにより、眼科医等は、各種診断（所見）を患者に対してわかり易く説明することもできる。

【0004】また、この各種データは、眼の光学特性に相当し、例えば、数値データとイメージデータ（グラフィックデータ）とに区分すると共に、これらの数値データとグラフィックデータとに対して、光学機器の撮像手

段（例えば、CCD）によって撮影された各種画像を処理又は合成して視覚的に見易い状態にすることが必要である。さらに、各種データの測定結果、測定データ、測定結果に対応する数値データは、複数の条件下で表示が行われる必要がある。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、従来の光学特性測定装置では、測定データ（測定結果）及び測定結果に対応する画像データや数値データ等、複数の条件下で求められた各種データを、まとめて表示し、又は、選択的にそれぞれ表示し、視覚的に見易くすることは困難である場合が想定される。

【0006】本発明は、以上の点に鑑み、複数の条件下で求めた測定データ（測定結果）、測定結果に対応する画像データ及び／又は数値データをまとめて、又は、選択的に表示する光学特性測定装置を提供することを目的とする。また、本発明は、被測定眼の全体、角膜、眼内等に対して、測定データ（測定結果）、測定結果に対応する画像データ及び／又は数値データをまとめて、又は、選択的にグラフィック表示等を用いて表示する光学特性測定装置を提供することを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】本発明の解決手段によると、被測定眼に所定パターン of 光束を照射する光源部を含む照射光学系と、被測定眼からの反射光を受光する受光部を含む受光光学系と、上記受光部からの測定データを示す受光信号に基づき、測定結果をグラフィック表示となるように演算する演算部と、上記受光信号に基づいた測定データと、上記演算部で求められた測定結果とを、グラフィック表示する表示部とを備えた光学特性測定装置を提供する。

【0008】

【発明の実施の形態】以下、図面を用いて本発明の実施の形態を詳細に説明する。図 1 は、本発明に関する光学特性測定装置 100 の概略光学系を示す図である。光学特性測定装置 100 は、例えば、対象物である被測定眼 60 の光学特性を測定する装置であって、第 1 照明光学系 10 と、第 1 受光光学系 20 と、送受光光学系 30 と、共通光学系 40 と、調整用光学系 50 とを備える。なお、被測定眼 60 については、図中、網膜 61、角膜 62 が示されている。第 1 照明光学系 10 は、例えば、第 1 波長の光束を発するための第 1 光源部 11 と、集光レンズ 12 とを備え、第 1 光源部 11 からの光束で被測定眼 60 の網膜（眼底）61 上の微小な領域を、その照明条件を適宜設定できるように照明するためのものである。なお、ここでは、一例として、第 1 光源部 11 から発せられる照明用の光束の第 1 波長は、赤外域の波長（例えば、780nm）である。

【0009】また、第 1 光源部 11 は、空間コヒーレンスが大きく、時間コヒーレンスが小さいものが望まし

10

20

30

40

50

い。ここでは、第1光源部11は、例えば、スーパー
ミネッセンスダイオード（SLD）であって、輝度の高
い点光源を得ることができる。なお、第1光源部11
は、SLDに限られるものではなく、例えば、空間コ
ヒーレンス、時間コヒーレンスが大きいレーザー等であ
っても、回転拡散板等を挿入し、適度に時間コヒーレン
スを下げることで、利用することができる。さらに、空間
コヒーレンス、時間コヒーレンスが小さいLEDであ
っても、光量さえ十分であれば、例えば、光路の光源の位
置にピンホール等を挿入することで、利用することがで
きる。

【0010】第1受光光学系20は、例えば、コリメ
ートレンズ21と、被測定眼60の網膜61から反射して
戻ってくる光束（第1光束）の一部を、少なくとも17
本のビームに変換する変換部材であるハルトマン板22
と、このハルトマン板22で変換された複数のビームを
受光するための第1受光部23とを備え、第1光束を第1
受光部23に導くためのものである。また、ここでは、
第1受光部23は、リードアウトノイズの少ないCCD
が採用されているが、CCDとしては、例えば、一般的
な低ノイズタイプ、測定用の2000*2000素子の
冷却CCD等、適宜のタイプのものを適用することがで
きる。

【0011】送受光光学系30は、例えば、後述するア
ライメント調整を主に行うものであって、第2波長の光
束を発するための第2光源部31と、集光レンズ32、
34と、ビームスプリッター33と、第2受光部35と
を備え、被測定眼60の角膜62から反射して戻って
くる光束（第2光束）を、第2受光部に導くためのもの
であって、主にアライメント調整を行う。また、第2光源
部31から発せられる光束の第2波長は、例えば、第1
波長（ここでは、780nm）と異なると共に、長い波
長を選択できる（例えば、940nm）。

【0012】共通光学系40は、第1照明光学系10か
ら発せられる光束の光軸上に配され、第1照明光学系1
0、第1受光光学系20及び送受光光学系30に共通に
含まれ得るものであり、例えば、ブラチドリング41
と、アフォーカルレンズ42と、ビームスプリッター4
3、45と、集光レンズ44とを備える。ブラチドリン
グ41は、後述するアライメント調整が完了した後、複
数の同心輪帯からなるパターンを指標を投影する。ま
た、ビームスプリッター43は、第2光源部31の波長
を被測定眼60に送光（反射）し、被測定眼60の角膜
62から反射して戻ってくる第2光束を反射し、一方、
第1光源部11の波長を透過するようなミラー（例
えば、ダイクロミックミラー）で形成される。ビームス
プリッター45は、第1光源部11の波長を被測定眼60
に送光（反射）し、被測定眼60の網膜61から反射し
て戻ってくる第1光束を、透過するようなミラー（例
えば、ダイクロミックミラー）で形成される。このビーム

スプリッター43、45によって、第1及び2光束が、
互いに他方の光学系に入りノイズとなることがない。

【0013】調整用光学系50は、例えば、後述する作
動距離調整を主に行うものであって、第3光源部51
と、第4光源部55と、集光レンズ52、53と、第3
受光部54を備え、主に作動距離調整を行うものであ
る。ここで、アライメント調整について説明する。ア
ライメント調整は、主に、送受光光学系30により実施さ
れる。

【0014】まず、第2光源部31からの光束は、集光
レンズ32、ビームスプリッター33、43、アフォー
カルレンズ42を介して、対象物である被測定眼60を
略平行な光束で照明する。被測定眼60の角膜62で反
射した反射光束は、あたかも角膜62の曲率半径の1/
2の点から射出したような発散光束として射出される。
この発散光束は、アフォーカルレンズ42、ビームス
プリッター43、33及び集光レンズ34を介して、第2
受光部35にスポット像として受光される。

【0015】ここで、この第2受光部35上のスポット
像が光軸上から外れている場合、光学特性測定装置10
本体を、上下左右に移動調整し、スポット像を光軸上
と一致させる。このように、スポット像が光軸上と一致
すると、アライメント調整は完了する。なお、アライ
メント調整は、被測定眼60の角膜62を第3光源部51
により照明し、この照明により得られた被測定眼60の
像が第2受光部35上に形成されるので、この像を利用
して瞳中心が光軸と一致するようにしてもよい。

【0016】つぎに、作動距離調整について説明する。
作動距離調整は、主に、調整用光学系50により実施さ
れる。まず、作動距離調整は、例えば、第4光源部55
から射出された光軸付近の平行な光束を、被測定眼60
に向けて照射すると共に、この被測定眼60から反射さ
れた光を、集光レンズ52、53を介して第3受光部5
4で受光することにより行われる。また、被測定眼60
が適正な作動距離にある場合、第3受光部54の光軸上
に、第4光源部55からのスポット像が形成される。一
方、被測定眼60が適正な作動距離から前後に外れた場
合、第4光源部55からのスポット像は、第3受光部5
4の光軸より上又は下に形成される。なお、第3受光部
54は、第4光源部55、光軸、第3受光部54を含む
面内での光束位置の変化を検出できればいいので、例
えば、この面内に配された1次元CCD、ポジションセン
シングデバイス（PSD）等を適用できる。

【0017】つぎに、第1照明光学系10と第1受光光学
系20との位置関係を概略的に説明する。第1受光光学
系20には、ビームスプリッター45が挿入されてお
り、このビームスプリッター45によって、第1照明光
学系10からの光は、被測定眼60に送光されると共
に、被測定眼60からの反射光は、透過される。第1受
光光学系20に含まれる第1受光部23は、変換部材で

あるハルトマン板22を通過した光を受光し、受光信号を生成する。

【0018】また、第1光源部11と被測定眼60の網膜61とは、共役な関係を形成している。被測定眼60の網膜61と第1受光部23とは、共役である。また、ハルトマン板22と被測定眼60の瞳孔とは、共役な関係を形成している。さらに、第1受光光学系20は、被測定眼60の前眼部である角膜62、及び瞳孔と、ハルトマン板22と略共役な関係を形成している。すなわち、アフォーカルレンズ42の前側焦点は、被測定眼60の前眼部である角膜62及び瞳孔と略一致している。

【0019】また、第1照明光学系10と第1受光光学系20は、第1光源部11からの光束が、集光する点で反射されたとして、第1受光部23での反射光による信号ピークが最大となるように、連動して移動する。具体的には、第1照明光学系10と第1受光光学系20は、第1受光部23での信号ピークが大きくなる方向に移動し、信号ピークが最大となる位置で停止する。これにより、第1光源部11からの光束は、被測定眼の網膜61上で集光する。

【0020】また、レンズ12は、光源11の拡散光を平行光に変換する。絞り14は、眼の瞳、あるいはハルトマンプレート21と光学的に共役の位置にある。絞り14は、径がハルトマンプレート21の有効範囲より小さく、いわゆるシングルパスの収差計測（受光側だけに目の収差が影響する方法）が成り立つ様になっている。レンズ13は、上記を満たすために、実光線の眼底共役点を前側焦点位置に、さらに、眼の瞳との共役関係を満たすために、後側焦点位置が絞り14と一致するように配置されている。

【0021】また、光線15は、光線24とビームスプリッター45で共通光路になった後は、近軸的には、光線24と同じ進み方をする。但し、シングルパス測定の場合は、それぞれの光線の径は違い、光線15のビーム径は、光線24に比べ、かなり細く設定される。具体的には、光線15のビーム径は、例えば、眼の瞳位置で1mm程度、光線24のビーム径は、7mm程度になることもある（なお、図中、光線15のビームスプリッター45から眼底61までは省略している）。

【0022】つぎに、変換部材であるハルトマン板22について説明する。第1受光光学系20に含まれるハルトマン板22は、反射光束を複数のビームに変換する波面変換部材である。ここでは、ハルトマン板22には、光軸と直交する面内に配された複数のマイクロフレネルレンズが適用されている。また、一般に、測定対象部（被測定眼60）について、被測定眼60の球面成分、3次の非点収差、Zernikeの3次と4次の高次収差までも測定するには、被測定眼60を介した少なくとも17本のビームで測定する必要がある。

【0023】また、マイクロフレネルレンズは、光学素

子であって、例えば、波長ごとの高さピッチの輪帯と、集光点と平行な出射に最適化されたブレードとを備える。ここでのマイクロフレネルレンズは、例えば、半導体微細加工技術を応用した8レベルの光路長差を施したもので、高い集光率（例えば、98%）を達成している。

【0024】また、被測定眼60の網膜61からの反射光は、アフォーカルレンズ42、コリメートレンズ21を通過し、ハルトマン板22を介して、その1次光として第1受光部23上に集光する。また、ハルトマン板22は、少なくとも17の領域に区分された各領域ごとに、収束作用を行うマイクロレンズ部と、透過作用を行う開口部とを備えるようにしてもよい。したがって、ハルトマン板22は、反射光束を少なくとも17本以上のビームに変換する波面変換部材を備える。

【0025】図2は、本発明に関する光学特性測定装置100の電気的構成を示す電気系ブロック図である。光学特性測定装置100に関する電気駆動系は、例えば、演算部210と、制御部220と、表示部230と、メモリ240と、第1駆動部250及び第2駆動部260とを備える。演算部210は、第1受光部23から得られる受光信号④、第2受光部35から得られる受光信号⑦、第3受光部54から得られる受光信号(10)を入力すると共に、全波面収差、角膜波面収差、ゼルニケ係数、収差係数、Strehl比、白色光MTF、ランドルト環パターン等（詳細は後述する。）を演算し、この演算結果に応じた信号を、電気駆動系の全体の制御を行う制御部220と、表示部230（各種の表示例については、後述する。）と、メモリ240とにそれぞれ出力する。

【0026】制御部220は、演算部210からの制御信号に基づいて、第1光源部11の点灯、消灯を制御したり、第1駆動部250及び第2駆動部260を制御するものであり、例えば、演算部210での演算結果に応じた信号に基づいて、第1光源部11に対して信号①を出力し、ブラチドリリング41に対して信号⑤を出力し、第2光源部31に対して信号⑥を出力し、第3光源部51に対して信号⑧を出力し、第4光源部55に対して信号⑨を出力し、さらに、第1駆動部250及び第2駆動部260に対して信号を出力する。

【0027】第1駆動部250は、例えば、演算部に入力された第1受光部23からの受光信号④に基づいて、第1照明光学系10全体を光軸方向に移動させるものであり、図示しない適宜のレンズ移動手段に対して信号②を出力すると共に、このレンズ移動手段を駆動する。これにより、第1駆動部250は、第1照明光学系10の移動、調節を行うことができる。

【0028】第2駆動部260は、例えば、演算部に入力された第1受光部23からの受光信号④に基づいて、第1受光光学系20全体を光軸方向に移動させるもので

あり、図示しない適宜のレンズ移動手段に対して信号③を出力すると共に、このレンズ移動手段を駆動する。これにより、第2駆動部260は、第1受光光学系20の移動、調節を行うことができる。

【0029】図3は、本発明に関する光学特性測定装置100の動作を示すフローチャートである。なお、説明の便宜上、ここでのフローチャートの説明は、概略的なものとし、具体的な説明は後述する。まず、測定者により測定対象物である被測定眼60の測定が開始され、第1受光部23又は第2受光部35からの像（例えば、ハルトマン像、前眼部像）を取得する（S101）。つぎに、眼の収差測定に関しては、ステップS101でのハルトマン像に関する数値データである、ハルトマン板22と第1受光部23との距離及び、座標等に基づいて、ゼルニケ係数を算出し、角膜収差測定に関しては、ブラチドリリング像のゆがみによる変位量等に基づいてゼルニケ係数を算出する（S103）。このゼルニケ係数に基づいて、被測定眼60の波面または角膜収差を算出する（S105）。

【0030】つぎに、ステップS101～105から得られた各種データを、表示部230にどのように表示するか表示モード選択を行う（S107）。なお、この各種データは、複数の条件下で求めた測定データ（測定結果）、測定結果に対応する画像データ及び／又は数値データとして、まとめて、又は、選択的に表示部230にグラフィック表示することができる（詳細は、後述）。また、ステップS107で選択された表示モードに応じて、各種画像及び／又はデータを表示部230に表示する（S109）。

【0031】また、ステップS109での表示例とは別の表示例を、表示部230に表示させる場合、ステップS107で選択した表示モード選択を変更するために、再度、表示モード選択を行う（S111）。一方、ステップS107で選択した表示モード選択を変更しない場合、測定を終了するか否かを判定する（S113）。ステップS113で測定を終了しない場合には、再度、像*

＊の取得を行う。一方、測定を終了する場合には、測定を終了する。以下、上述の各ステップの処理について詳細に説明する。

【0032】（ステップS101について）

（表示部230に表示される被測定眼60の像について）この像は、例えば、ハルトマン板22上に開けられた開口部を通過したことにより得られる、いわゆるハルトマン像であると共に、撮像手段であるCCDを適用した第1受光部23によって撮像された生画像である。また、例えば、患者の被測定眼60に対して第1受光光学系20の調整が不足気味であれば、ハルトマン板22で変換された複数のビームは、概ね外側に広がる傾向にある（後述する表示例に含まれるハルトマン像上に示した矢印に対応）。

【0033】（ステップS103、105について）

（眼の収差マップ、角膜収差マップ、俯瞰図と、数値データである眼の収差表示部、角膜収差表示部とを、表示部230に表示する際、必要とされるゼルニケ係数について）ここで、一般に知られているゼルニケの多項式 Z_i （対象物で変化しない固定値であって、ここでは、既知である）を用いてゼルニケ係数 C_i を算出する方法について説明する。

【0034】まず、ゼルニケ係数 C_i は、被測定眼の光学特性を把握するための重要なパラメータである。このパラメータは、例えば、ハルトマン板22を介して第1受光部23で得られた光束の傾き角に基づいて、被測定眼60の光学特性を求める演算部210の動作原理となる。光学特性測定装置100は、被測定眼60の波面収差 $W(X, Y)$ とする）を測定する。このため、変換部材であるハルトマン板22の縦横の座標を (X, Y) とし、さらに、第1受光部23の縦横の座標を (x, y) とすると、一般に、以下の数式3で表される波面収差 $W(X, Y)$ は、同じく、以下の数式1及び数式2の関係が成り立つ。すなわち、

【0035】

【数1】

$$\frac{\partial W(X, Y)}{\partial X} = \frac{\Delta x}{f}$$

【0036】

※ ※ 【数2】

$$\frac{\partial W(X, Y)}{\partial Y} = \frac{\Delta y}{f}$$

【0037】ここで、 f ：ハルトマン板22と第1受光部23との距離である。

【0038】

* * 【数3】

$$W(X, Y) = \sum_{l=0}^n \sum_{j=0}^l c_{lj} Z_{lj}(X, Y)$$

【0039】また、数式3の両辺を、ハルトマン板22 ※₁は、以下の数式4及び数式5で表され、具体的に上の座標(X, Y)で偏微分することにより、ゼルニケ 10 は、図19、20に示される。係数 c_{lj} を得る。ここで、ゼルニケの多項式Z ※ 【数4】

$$Z_{nm} = R_n^{n-2m}(r) \begin{cases} \frac{\sin}{\cos} \end{cases} \left\{ (n-2m)\theta \right\}$$

$n-2m > 0$ のとき sin

$n-2m \leq 0$ のとき cos

【数5】

$$R_n^{n-2m}(r) = \sum_{s=0}^m (-1)^s \frac{(n-s)!}{s!(m-s)!(n-m-s)!} r^{n-2m}$$

また、ゼルニケ係数 c_{lj} は、以下の数式6の自乗誤差 ★る。
を最小にすることにより、具体的な値を得ることができ★30 【数6】

$$S(x) = \sum_{i=1}^{data\ number} \left[\left\{ \frac{\partial W(X_i, Y_i)}{\partial X} - \frac{\Delta x_i}{f} \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial W(X_i, Y_i)}{\partial Y} - \frac{\Delta y_i}{f} \right\}^2 \right]$$

【0040】(ステップS107、109について)ここで、複数の条件下で求めた測定データ(測定結果)、測定結果に対応する画像データ及び/又は数値データを、まとめて、又は、選択的に、表示部230上に表示する場合の表示例について説明する。まず、ステップS107による表示モード選択では、例えば、測定者が後述する第1～8の表示例のうち所望の表示例を選択することができる。なお、測定者は、第1～8の表示例に含まれる各要素を選択的に表示することもできる。ここで、説明の便宜上、第1～8の表示例に含まれる各要素

についてそれぞれ説明する。

【0041】(表示部230に表示される眼の収差表示部に含まれる収差係数について)被測定眼の収差成分を、例えば、収差係数(ここでは、単位: μm)として数値化する場合、ゼルニケ係数($n=1, 2, 3, 4, 5, 6$)であるとき、収差係数のRMS値(平均2乗誤差)をそれぞれS1、S2、S3、S4、S5、S6とすると、

【0042】

【数7】

$$S3 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{C_{30}^2 + C_{31}^2 + C_{32}^2 + C_{33}^2}$$

$$S4 = \frac{1}{\sqrt{10}} \sqrt{C_{40}^2 + C_{41}^2 + 2C_{42}^2 + C_{43}^2 + C_{44}^2}$$

$$S5 = \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{C_{50}^2 + C_{51}^2 + C_{52}^2 + C_{53}^2 + C_{54}^2 + C_{55}^2}$$

$$S6 = \frac{1}{\sqrt{14}} \sqrt{C_{60}^2 + C_{61}^2 + C_{62}^2 + 2C_{63}^2 + C_{64}^2 + C_{65}^2 + C_{66}^2}$$

$$S1 = \frac{1}{2} \sqrt{C_{10}^2 + C_{11}^2}$$

$$S2 = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{C_{20}^2 + 2C_{21}^2 + C_{22}^2}$$

$$S(3+5) = \sqrt{S3^2 + S5^2}$$

$$S(4+6) = \sqrt{S4^2 + S6^2}$$

$$S(3+4+5+6) = \sqrt{S3^2 + S4^2 + S5^2 + S6^2}$$

【0043】となる。ここで、S1は、チルトを意味し、S3、S5、S(3+5)は、コマ様収差となり、同じく、S2、S4、S6、S(4+6)は、球面様収差となる。なお、通常、S2を除きS3以上の収差を高次収差と呼ぶ。つぎに、この高次収差の分類について説明する。高次収差は、例えば、ゼルニケ係数 C_i 、中の $\sin(n\theta)$ 、 $\cos(n\theta)$ の n の値により分類される(ゼルニケ係数 C_i は、上述の数式3及び数式4に示すように、正弦及び余弦関数を含んでいる)。具体的には、 $n=0$ (fold)であれば、球面収差となり、 $n=1$ (fold)であれば、コマ収差となり、同じく、 $n=2$ (fold)であれば、非点収差となり、さらに、 $n=3$ (fold)であれば、矢状収差とそれぞれ分類される。また、対称収差(コマ様収差)は、4次収差+6次収差を意味し、同じく、非対称収差(球面様収差)は、3次収差+5次収差を意味する。なお、高次収差の次数は、必要に応じて決められるものであって、6次までに限らず、例えば、8次では3次+5次+7次がコマ様収差、4次+6次+8次が球面様収差をそれぞれ意味する。つぎに、ゼルニケ係数 C_i を用いて、上述の各収差を表現する場合について説明する。図18は、ゼルニケ係数 C_i による各収差の表現形式600を示す図である。各収差の表現形式600としては、例えば、各収差の名称、ゼルニケ収差係数、方向Ax(例えば、X軸から反時計回り)、及び上述のRMSの平方にそれぞれ項目分けされる。また、各収差の表現形式600は、図示のように、3次球面収差を示す項目601、5次球面収差を

示す項目602、7次球面収差を示す項目603、3次コマ収差を示す項目604、矢状収差を示す項目605、5次コマ収差を示す項目606、3次非点収差を示す項目607、及び5次非点収差を示す項目608を含む。なお、これらの各収差は、主に、後述する第5～8表示例において、眼及び角膜の収差表示として、一括、又は、選択的に表示部230上に表示される。

【0044】(表示部230に表示される白色光MTFについて)つぎに、白色光MTF(Modulation transfer function)の算出について説明する。まず、MTFは、空間周波数の伝達特性を示す指標であって、光学系の性能を表現するために広く使われている。このMTFは、例えば、1度当たり、0～100本の正弦波状の濃淡格子に対しての伝達特性を求めることで見え方を予測することが可能である。

【0045】まず、単色MTFを波面収差 $W(x, y)$ から算出する。なお、 $W(x, y)$ は、入力値(測定値)であって、角膜収差に関しては、角膜形状から求めた角膜波面収差を用いることもできる。瞳関数 $f(x, y)$ は、波面収差から以下のように求まる。

$$f(x, y) = e^{i \cdot k \cdot W(x, y)}$$

ここで、 i :鏡像、 k :波数ベクトル($2\pi/\lambda$)である。また、この瞳関数 $f(x, y)$ をフーリエ変換することにより、点像の振幅分布 $U(u, v)$ が求まる。

【0046】

【数8】

$$U(u, v) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp \left[-\frac{i}{R} \frac{2\pi}{\lambda} (ux + vy) \right] dx dy$$

【0047】ここで、 λ ：波長、 R ：瞳から像点（網膜）までの距離、 (u, v) ：網膜上の像点 O を原点とし、光軸に直行する面内での網膜の座標値、 (x, y) ：光学系の瞳面内の座標値である。また、点像の振幅分布 $U(u, v)$ とその複素共役を掛けることにより、点像の強度分布（PSF：Point Spread Function） $I(u, v)$ が求まる。

* $I(u, v) = U(u, v) U^*(u, v)$
さらに、点像の強度分布 $I(u, v)$ をフーリエ変換すると共に、いわゆる空間周波数変換である（ $R(r, s)$ ）規格化を行うことにより、OTF（Optical Transfer Function）が求まる。

【0048】

* 【数9】

$$R(r, s) = \int \int_{-\infty}^{\infty} I(u, v) e^{-i2\pi(ru + sv)} du dv$$

【0049】ここで、 r, s ：空間周波数領域の変数である。

$OTF(u, v) = R(r, s) / |R(0, 0)|$

また、OTFの大きさがMTFであるため、

$MTF(r, s) = |OTF(u, v)|$

が成り立つ。つぎに、上述のように求められた単色MTFに基づいて、白色光MTFを算出する。白色光MTF※

20※を求めるには、まず、各波長でのMTFに重み付けをし、足し合わせる。ここで、上述のMTFは、波長ごとに値が異なるため、波長 λ でのMTFを MTF_{λ} と表すと、

【0050】

【数10】

$$MTF(r, s) = \frac{\int \omega_{\lambda} MTF_{\lambda}(r, s) d\lambda}{\int \omega_{\lambda} d\lambda}$$

【0051】ここでは、可視光に多く重み付けをし、計算を行う。具体的には、色の3原色（RGB）である赤、緑、青が、例えば、656.27nm：1、587.56nm：2、及び486.13nm：1であるとすると、

$MTF(r, s) = (1 \times MTF_{656.27} + 2 \times MTF_{587.56} + 1 \times MTF_{486.13}) / (1 + 2 + 1)$

となる。

【0052】また、白色光MTFは、一波長（840nm）のみで測定されるので、この測定結果に基づいて他の波長について校正を行い、白色に補正することにより求めてもよい。具体的には、各波長でのMTFは、眼の収差の場合、眼光学特性測定装置での測定波長が、例えば、840nmであるとき、模型眼により各波長840nmでの波面収差 $W_{s.s.o.}(x, y)$ からのずれ量に相当する色収差 $W_{\Delta}(x, y)$ を測定し、この色収差 $W_{\Delta}(x, y)$ に $W_{s.s.o.}(x, y)$ を足し合わせ、この波

面収差によりMTFを算出することにより求められる。すなわち、

【0053】

$W_{\lambda}(x, y) = W_{s.s.o.}(x, y) + W_{\Delta}(x, y)$ となる。さらに、角膜波面収差の場合、測定された角膜形状は波長に依存しないが、形状を波面収差に変換するときに使用する角膜の屈折率が波長に依存すること、瞳関数の式に波長がパラメータのひとつであることから、MTFがこの場合も波長に依存することになる。

【0054】（表示部230に表示される眼の収差表示部及び角膜収差表示部に含まれるStrehl比について）Strehl比（ここでは、 S ）は、上述のように求められた点像の強度分布であるPSFの中心強度 $I(0, 0)$ を、無収差光学系の場合に得られるPSFの中心強度 $I_0(0, 0)$ で割ることにより、求められる。すなわち、

$S = I(0, 0) / I_0(0, 0)$

となる。

【0055】（表示部230に表示されるランドルト環、例えば、視力検査用のマークの表示、見え方について）図4は、ランドルト環の表示に関するフローチャートである。まず、測定者（例えば、眼科医等）は、患者の視力を検査するために適宜の視力に応じた大きさを有するランドルト環を、上述のハルトマン板22に取り付ける。第1受光部23は、この取り付けられたランドルト環の大きさに基づいて、視力いくつのランドルト環であるかを判定する（S201）。このランドルト環のパターンを示す輝度分布関数 $L_{and}(x, y)$ を求める（S203）。ここで、輝度分布関数 $L_{and}(x, y)$ は、ハルトマン板22と第1受光部23との間でのXY座標のずれ（上述の撮影した生画像上に付与した矢印の長さをX方向、Y方向にそれぞれベクトル分解した値）に基づいて求められる。

【0056】つぎに、この輝度分布関数 $L_{and}(x, y)$ に対して2次元フーリエ変換を行うことにより、 $FR(u, v)$ を求める（S205）。この $FR(u, v)$ と、既に求めた上述のOTF (u, v) とをコンボリューションすることにより、眼の光学系通過後の周波数分布であるOR (u, v) を求める（S207）。このOR (u, v) に対して2次元逆フーリエ変換を行うことにより、 $L_{andImage}(X, Y)$ を求める（S209）。

【0057】このステップS209で求められた $L_{andImage}(X, Y)$ は、表示部230の表示画面上にグラフィック表示される（S211）。なお、ここでは、瞳孔の大きさが $\phi 3$ （明視野）、及び $\phi 7$ （暗視野）両方での「視力0.7ランドルト環の見え方」として表示されている。以下、上述の各要素を、まとめて、又は選択的に表示した第1～8表示例について説明する。但し、表示部230に表示される同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。

【0058】（第1の表示例）図5は、表示部230にグラフィック表示される第1の表示例を示す説明図である。表示部230には、例えば、撮影した生画像であるハルトマン像300と、眼の収差マップ310と、眼の収差表示部320と、白色光MTF表示330と、ランドルト環の見え方表示340とが表示される。なお、この表示部230には、例えば、患者の名前（ここでは、東京 光子）、測定時刻（ここでは、2000年3月2日 午前8時4分）、複数の測定条件（ここでは、測定の種類である波面測定、被測定眼60の種類である無散瞳、測定波長である840nm、被測定眼60の測定範囲である $\phi 9mm$ ）等が表示される。

【0059】ハルトマン像300は、例えば、患者の被測定眼60の網膜61からの反射光に基づいた画像であって、ここでは、患者のまぶた301も表示されている。また、ハルトマン像300は、ハルトマン板22を介して複数の略平行な光束が第1受光部23上に受光さ

れたと仮定した場合の像点302と、網膜61からの反射光が、ハルトマン板22に開けられた透過部又は開口部を介して、概ね外側に広がった光束として第1受光部23上に受光された場合での領域点303とを含む。また、このハルトマン像300に表示されている実線304（始点を像点302、終点を領域点303の中心とする）を第1受光部23の縦横の座標軸に沿って、ベクトル分解した場合に得られる値は、光束の変位を数値化したものであって、上述のゼルニケ係数を求める際に必要とされる Δx 、 Δy に相当する。

【0060】眼の収差マップ310は、例えば、明視野での瞳孔（ここでは、 $\phi 3mm$ ）を示す同心円311と、暗視野での瞳孔（ここでは、 $\phi 7mm$ ）を示す同心円312と、光束のずれを考慮したゼルニケ係数から算出された波面収差を等高線で表示した複数の略楕円状の環313とを含む。なお、この眼の収差マップ310の外周縁には、例えば、 10° 毎の目盛り（ $0 \sim 360$ ）が表示され、視覚的にも見易いようになっている。また、眼の収差マップ310の近傍には、被測定眼60の測定範囲に応じたスケール（例えば、 $1.0\mu m$ 毎、 $-5.0 \sim 5.0$ の目盛り）314が表示される。

【0061】ここで、波面収差として、被測定眼の低次収差を含めた全ての収差、又は、高次（3次以上）の収差が必要に応じて表示される。この波面収差の表示は、必要に応じて、色彩や、濃度などを変えてグラフィック表示が行われる。また、全ての収差は、2次以上の収差を初期値として表示するが、1次以上の収差を全収差として表示するよう選択することもできる。

【0062】眼の収差表示部320には、明視野（ここでは、 $\phi 3mm$ ）及び暗視野（ここでは、 $\phi 7mm$ ）での各種の数値データが表示される。具体的には、上述したゼルニケ係数を用いて算出された被測定眼60の収差成分（例えば、コマ様収差、球面様収差）であって、数値データである収差係数 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_6 、 $S_3 + S_5$ 、 $S_4 + S_6$ 、 $S_3 + S_4 + S_5 + S_6$ と、上述の見易さの指標として使用される、いわゆるStrehl比の数値データと、 $1/\text{眼の焦点距離である球面度数}$ （ここでは、 S で表示され、単位D：いわゆるディオプター値）と、乱視度数（ここでは、 C で表示され、単位D）と、乱視軸（ここでは、 A で表示され、単位 $^\circ$ ）と、視力（ここでは、PVA）とがそれぞれ表示される。ここで、球面度数と乱視度はゼルニケ係数の2次項（ S_2 ）から求められる。なお、上述した眼の収差マップ310上に表示される複数の略楕円状の環313は、これらの収差係数を考慮している。

【0063】白色光MTF表示330は、上述したように、正弦波格子などの見え方を示す指標であって、ここでは、横軸を空間周波数（cycle/deg）とし（例えば、 1° 当たり $0 \sim 100$ 本の黒線を施した場合に相当する値）、縦軸を白黒パターンの見え方の程度（ $0 \sim 1$ ）と

するグラフとして表示される。具体的には、ここでは、明視野（ここでは、 $\phi 3\text{mm}$ ）で視力0.9である場合でのグラフと、暗視野（ここでは、 $\phi 7\text{mm}$ ）で視力0.7である場合でのグラフとが比較できるように、まとめて表示されている。なお、グラフ上での斜線は、正常範囲を示している。

【0064】ランドル環の見え方表示340は、上述したように、視力検査用のマークが患者の網膜61上でどのように見えているのかを示している。ここでのランドル環の見え方表示340は、例えば、明視野（こ
10 へ、 $\phi 3\text{mm}$ ）で、この測定結果である場合、視力0.7に対応するランドル環は、ぼやけることなく細く良く見えており、暗視野（ここでは、 $\phi 7\text{mm}$ ）で、この測定結果である場合、多少ぼやけるために太く見えていることを示している。

【0065】図6(a)は、第1の表示例に対する変形例を示す説明図(1)である。ここでは、第1の表示例での表示部230に対して、撮影した生画像であるハルトマン像300に、波面収差を測定するのに使用した像点の重心位置を、黒塗り三角形351として示したハルトマン像350を表示した例を示している。このハルトマン像350における図中、黒塗り三角形351は、ハルトマン板に設けられた格子点（小さな穴、開口又は透過部分）と測定された照射領域点の対応がとれているものであって、照射領域での重心位置に配置される。その重心位置は、照射強度と照射位置に基づき、いわゆるモーメント法などの手法によって求めることができることを示す。

【0066】また、ここでは、第1の表示例での表示部230に対して、眼の収差マップ310に加えて、対応
30 がとれ、測定結果の得られたハルトマン板に設けられた格子点をオーバーレイ表示した眼の収差マップ360を表示した例を示している。

【0067】図6(b)は、第1の表示例に対する変形例を示す説明図(2)である。ここでは、第1の表示例での表示部230に対して、撮影した生画像であるハルトマン像300それ自体355を表示した例を示している。

【0068】図7は、第1の表示例に対する変形例を示す説明図(3)である。ここでは、第1の表示例での表示部230に対して、眼の収差マップ310の代わりに、被測定眼60の測定範囲での3次元形状を示す俯瞰マップ370を表示した例を示している。俯瞰マップ370は、例えば、測定範囲 $\phi 9\text{mm}$ に応じて、瞳の中心点を原点とした平面用スケール（ここでは、 $-4.5 \sim 4.5$ ）と、立体用スケール（ここでは、 $-5.0 \sim +5.0\mu\text{m}$ ）とを用いて3次元形状を表示している。なお、表示部2309では、上述のハルトマン像300、350と、眼の収差マップ310、360と、俯瞰マップ370とを用いて、適宜の表示パターンを選択して作
50

成することができる。

【0069】また、上述の表示例によれば、明所時（瞳孔径小、例えば、 $\phi 3\text{mm}$ ）、及び暗所時（瞳孔径大、例えば $\phi 7\text{mm}$ ）での収差係数の表示を行うことで、両者を比較することができる。また、例えば、眼科医、検査技師等が、表示された収差係数の値が大きく、何らかの対策（例えば、通院、入院等による治療）が必要であると判断する貴重なデータとなり得る数値データについては、注意度合いに応じて、例えば、正常値から離れていくにつれて、青→水色→黄緑→黄色→赤等のように色が変化するように表示することもできる。

【0070】また、白色光MTF表示330についても、明視野及び暗視野での両方の表示を行うことができる。また、測定によって得られた係数から矯正視力の表示を行ってもよい。さらに、この矯正視力に基づいてランドルト環の見え具合を推測したものを表示してもよい。また、収差の単位は、 μm 、 nm 、 λ 等のいずれかを選択できるようにしてもよい。また、両眼表示の選択を行えるようにしても良い。

20 【0071】（第2の表示例）図8は、表示部230にグラフィック表示される第2の表示例を示す説明図である。表示部230には、例えば、ブラチド測定の表示380と、角膜収差マップ390と、角膜収差表示部400と、白色光MTF（ $\phi 3$ 、 $\phi 7\text{mm}$ ）の表示330と、ランドル環の見え方の表示340とが表示されている。なお、ここでの被測定眼60の測定範囲は、例えば、 $\phi 12\text{mm}$ である。

【0072】ブラチド測定の表示380は、上述したように、アライメント調整が完了した後、複数の同心輪帯381からなるパターンの指標を投影するブラチドリング41を用いて、第3光源51からの光束を、被測定眼60の角膜62上に照射すると共に、この複数の同心輪帯381を伴った角膜62からの反射光を、第2受光部35上で受光した受光信号に基づく表示である。また、ハルトマン板22を取り除くか調整することにより、受光部23で測定することも可能である。測定されたブラチドリング41の各座標における同心円からのずれを Δx 、 Δy として、前述と同様にゼルニケ係数を算出し、さらに波面を算出することにより角膜収差を求めることができる。

【0073】角膜収差マップ390は、明視野での瞳孔（ここでは、 $\phi 3\text{mm}$ ）を示す同心円311と、暗視野での瞳孔（ここでは、 $\phi 7\text{mm}$ ）を示す同心円312と、光束のずれを考慮したゼルニケ係数から算出された角膜収差を表示した等高線391とを含む。なお、この角膜収差マップ390の外周縁には、例えば、 10° 毎の目盛り（ $0 \sim 360$ ）が表示され、視覚的にも見易いようになっている。また、角膜収差マップ390の近傍には、被測定眼60の測定範囲（ここでは、 $\phi 12\text{mm}$ ）に応じたスケール（例えば、 $1.0\mu\text{m}$ 毎、 -5 、

0～5.0の目盛り)314が表示される。

【0074】角膜収差表示部400は、上述の眼の収差マップ310に対して、1/(眼の焦点距離(単位メートル))である球面度数S、乱視度数C、及び乱視軸Aの代わりに、角膜のみを光学系としたときの度数である角膜収差(ここでは、Dで表示され、単位D)と、曲率半径mmと、軸方向(ここでは、Aで表示され、単位°)と、最大曲率半径となる場所を示すHと、最小曲率半径となる場所を示すVとが表示される。なお、眼の収差表示部230が眼全体(すなわち、網膜61)に基づいて算出されたものであるのに対し、角膜収差表示部400は角膜62だけに基づいて算出されたものである。眼の収差表示部320、及び角膜収差表示部400に表示される具体的な数値データは、図示のように異なっている。

【0075】(第3の表示例)図9は、表示部230にグラフィック表示される第3の表示例を示す説明図である。ここでは、第2の表示例での表示部230に対して、ブラチド測定の表示380の代わりに、角膜形状によるAxial Powerマップ410、Refractive Powerマップ420、Instantaneous Powerマップ430のうちいずれかを、まとめて、又は、選択的に表示させる。但し、ここでの測定範囲は、例えば、φ9mmであって、上述の角膜収差マップ390の測定範囲もこれと同等にして表示する。また、角膜形状によるPowerマップ410、420、430の近傍には、被測定眼60の測定範囲(ここでは、φ9mm)に応じたスケール(例えば、0.5D毎、35.5～52.0(D)の目盛り)を表示してもよい(後述)。

【0076】(第4の表示例)図10は、表示部230にグラフィック表示される第4の表示例を示す説明図である。この表示部230には、例えば、眼の収差マップ310と、角膜収差マップ390と、この眼及び角膜の収差マップ310、390に基づいて算出された眼内(内部)収差マップ440と、眼内(内部)収差表示部450とが表示されている。また、眼内(内部)収差マップ440は、例えば、眼内(内部)収差マップ440に表示される眼内収差係数に基づいて表示される。この眼内収差係数は、例えば、眼の収差マップ310を表示させるための眼全体の収差係数から、角膜収差マップ390を表示させるための角膜収差係数を引くことにより算出される数値データである。この表示例によれば、眼内(内部)収差を表示することにより、眼の収差に与える角膜収差以外の影響を考慮することができる。

【0077】図11は、第4の表示例に対する変形例を示す説明図である。ここでは、第4の表示例での表示部230に対して、眼の収差マップ310、角膜収差マップ390、眼内(内部)収差マップ440に加えて、対応がとれ測定結果の得られたハルトマン板に設けられた格子点を各収差のカラーマップにオーバーレイ表示し

た、眼の収差マップ460、角膜収差マップ470、眼内(内部)収差マップ480をそれぞれ表示した例を示している。

【0078】図12は、角膜収差測定を示すフローチャートである。ここでは、特に、角膜収差測定の場合におけるゼルニケ係数の算出(S103)及びゼルニケ係数から波面算出(S105)について詳細に説明する。まず、第2受光部35からの信号に基づき、角膜頂点を基準とし、ブラチドリングの受光位置に応じて角膜形状の高さを示す角膜形状のマップ(Hight Map)のデータを算出する(S301)。ステップS301で求めた角膜形状になるべくフィットする参照球面の形状を算出する(S302)。これにより、ゼルニケ係数の算出精度の向上が図れる。測定範囲(例えば、φ3、φ7)に応じて必要な個所を求めれば足りる。

【0079】つぎに、角膜形状の成分から参照球面の成分を減算する(S303)。これにより、参照球面との相違のみの残差成分が求められる。ここで、参照球面の球面収差を算出する(S304)。ステップS303で求めた残差成分の波面収差を算出する(S305)。また、測定波面と参照球面の波面収差を合成したのちにゼルニケ係数を算出する第1測定モードと、ゼルニケ係数を測定波面と参照球面の波面収差のそれぞれの収差に対して求めて、ゼルニケ係数を合成する第2測定モードとの間で選択が行われる(S306)。ここで、第1測定モードの選択がされるとステップS307に進み、第2測定モードが選択されるとステップS309に進む。

【0080】第1測定モードでは、ステップS304で求められた参照球面の波面収差と、ステップS305で求められた残差成分の波面収差を加えた後、それらの波面収差を角膜波面収差として求める(S307)。さらに、ステップS307で求められた角膜波面収差のゼルニケ係数を算出する(S308)。なお、このゼルニケ係数は、角膜収差を示している。これが終了すると、図3のステップS107に進み、表示モードが選択されその後の処理に進む。

【0081】一方、ステップS306において、第2測定モードが選択されると、参照球面の波面収差からゼルニケ係数を算出する(S309)。つぎに、ステップS305で求められた残差成分の波面収差からゼルニケ係数を算出する(S310)。ステップS309、S310で求められたゼルニケ係数を合成して、角膜収差を求める(S311)。これが終了すると、図3のステップS107に進み、表示モードが選択されその後の処理に進む。

【0082】(第5の表示例)図13は、表示部230にグラフィック表示される第5の表示例を示す説明図である。表示部230は、例えば、眼の収差と角膜の収差とを一括表示したものであって、眼の収差表示としては、上述の第1の表示例で示した撮影した生画像である

10

20

30

40

50

ハルトマン像300（ここでは、Imageと表示し、詳細な画像は、省略する）と、少なくとも2次以上の収差を含む被検眼の全収差315と、3次以上の収差を含む高次収差316とを含み、さらに、角膜の収差表示としては、上述の第2の表示例で示したブラチド測定の表示であるブラチド像380（ここでは、Imageと表示し、詳細な画像は、省略する）と、上述の第3の表示例で示したAxial Power マップ410と、角膜高次収差マップ395とを含む。さらに、表示部230には、眼の収差と角膜の収差に対応した数値データを含む眼及び角膜の収差表示部490が表示される。

【0083】また、全収差315、及び高次収差316の表示形態は、第1の表示例で詳述した眼の収差マップ310と略同様であり、ここでは、その詳細な表示を省略する。また、角膜高次収差マップ395の表示形態は、第2の表示例で詳述した角膜収差マップ390と略同様であり、ここでは、その詳細な表示を省略する。また、ここでの各マップの近傍に表示されているスケール314は、第1の表示例で詳述したスケールと同一である。なお、スケール314スケールの単位は、適宜変更可能であって、例えば、全収差315のスケール単位としては、 $-5.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ だけでなく、 $-10.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 、又は、 $-15.0 \sim 15.0 \mu\text{m}$ に設定してもよい。このように、スケール単位を変更することで、球面度数が大きいときの変化をわかりやすく表示することもできる。

【0084】また、Axial Power マップ410の近傍には、ディオプター値(D)を示すスケール319が表示される。各マップの近傍に表示されているスケール319は、ここでは、第2の表示例で詳述したスケールと同一である。なお、スケール319のスケールの単位は、適宜変更可能であって、 $35.5 \sim 52.0$ (D)に限らない。また、ここでは、角膜のPower mapとして、Axial Power マップ410を表示しているが、このAxial Power マップ410の代わりに、例えば、第3の表示例で示したRefractive Power420、Instantaneous Power430、及びゼルニケ係数から求めた後述する角膜の全収差の球面成分にあたる項の係数 C_2 、を眼の全収差を表すゼルニケ係数のうち球面成分にあたる項の係数 C_2 に置き換えた2次以上もしくは1次以上（選択可）の全収差を、選択的に表示するようにしてもよい。また、各収差マップの表示領域は、暗所時の瞳径（例えば $\phi 6$ ）又は、散瞳の瞳径（例えば $\phi 8$ ）で算出された収差マップを表示するようにしてもよい。なお、角膜のPower mapの表示領域は、変更することができる。

【0085】また、眼及び角膜の収差表示部490は、例えば、眼の収差表示については、第1の表示例で示した眼の収差表示部320に対応し、同じく、角膜の収差表示については、第2の表示例で示した角膜表示部400に対応している。但し、ここでは、後述する散瞳につ

いての数値データも表示される。眼及び角膜の収差表示部490は、例えば、瞳の径に応じて、明所時、暗所時、散瞳として区分した数値データを表示する。なお、ここでは、適宜の数値データが表示されるため、具体的な数値は省略した。

【0086】ここで、明所時とは、いわゆる明所視(photoptic vision)であって、比較的高いレベルの輝度数 cd/m^2 以上の明るさで観察している状態、生理学的には、錐体だけでもものを見ている状態を意味する。暗所時とは、いわゆる暗所視(scotopic)であって、暗く低い輝度レベル輝度数（例えば、 $10^{-3} \text{cd}/\text{m}^2$ ）で観察している状態、生理学的には、主に棒体だけでもものを見ている状態を意味する。また、散瞳とは、いわゆるダイレイト(dilate)であって、一般の暗所視よりも瞳径が更に拡大した状態を意味しており、例えば、被験者が暗所時よりもさらに暗い所で長時間過ごした場合、被験者の瞳が自然に暗所時よりも拡大する状態を意味する。なお、明所時、暗所時及び散瞳に対応する瞳径は、それぞれ変更することができる。また、散瞳の表示については、表示/非表示を選択することもできる。

【0087】また、全収差マップ315は、ここでは、少なくとも2次以上の収差としたが、1次収差（チルト）を含むことで、例えば、円錐角膜等、特殊な形状を表示することができる場合も想定されるので、1次収差以上を全収差として表示してもよい。

【0088】（第6の表示例）図14は、表示部230にグラフィック表示される第6の表示例を示す説明図である。表示部230は、例えば、眼の収差と角膜の収差とを選択的に表示したものであって、ここでは、説明の便宜上、眼の収差と角膜の収差表示の2つのパターンを兼用して示している。眼の収差表示としては、上述の第1の表示例で示した撮影した生画像であるハルトマン像300（ここでは、Image385と表示し、詳細な画像は、省略する）と、3次以上の収差を含む高次収差316と、高次収差316に含まれる各高次収差を非対称収差と対称収差とにそれぞれ分けて表示したコマ様収差マップ317、球面様収差マップ318と、球面成分に対応する波面収差Sのマップ500と、非点収差（乱視成分）に対応する波面収差Cのマップ510とを含む。

【0089】また、角膜の収差としては、上述のハルトマン像300の代わりに、第2の表示例で示したブラチド測定の表示であるブラチド像380（ここでは、Image385と表示し、詳細な画像は、省略する）を表示する以外は、眼の収差表示と略同一であるため説明を省略する。なお、眼及び角膜の収差表示部495には、第5の表示例で示した眼及び角膜の収差をまとめて表示する眼及び角膜の収差表示部490に対して、眼の収差、又は、角膜の収差が選択的に表示される。

【0090】ここで、球面成分に相当する波面収差Sの

マップ500は、例えば、第2駆動部260により第1受光光学系20が移動された移動量に対応するディオプター値($S_{m.o.t.o.r}$)と、得られたハルトマン像300から求めた球面成分に対応するゼルニケ係数をディオプター値に換算した値とに基づいて、算出される。すなわち、

$$S = S_{m.o.t.o.r} - 2C_{2,1} / (rc)^2$$

となる。ここで、 $S_{m.o.t.o.r}$ ：第1及び2駆動部250、260の移動量に対応するディオプター値、 rc ：解析してマップに表示する瞳径である。一方、この波面収差Sのマップ500を表示する場合には、第1受光光学系20が移動された移動量に対応するディオプター値($S_{m.o.t.o.r}$)をゼルニケ係数に換算し、これにハルトマン像300から求めた球面成分に対応するゼルニケ係数を加えることで算出する。

【0091】図15は、第6の表示例に対する変形例を示す説明図である。ここでは、第6の表示例での表示部230に対して、球面成分に対応する波面収差Sのマップ500、及び非点収差(乱視成分)に対応する波面収差Cのマップ510の代わりに、第5の表示例で示した全収差マップ315と、全収差マップ315及び第6の表示例で示した高次収差マップ316から算出した点像強度分布(PSF)520とを表示させると共に、高次収差マップ316、コマ収差マップ317、及び球面収差マップ318の表示位置を変更してそれぞれ表示した例を示している。

【0092】また、点像強度分布(PSF)520の表示は、3次以上の高次収差の影響を受けた点像強度分布(PSF)を表示するモードと、2次以上を含む全収差の点像強度分布(PSF)を表示するモードとを選択することができる。なお、眼及び角膜の収差表示部495は、第6の表示例と同一であり、説明を省略する。

【0093】(第7の表示例)図16は、表示部230にグラフィック表示される第7の表示例を示す説明図である。表示部230は、眼の収差と角膜の各収差を個別に表示するものであって、眼及び角膜の収差に関しては、その各収差を、例えば、球面成分、非点成分、コマ収差、矢状収差、残余収差としてそれぞれ表示させる。表示部230には、具体的には、第6の表示例で示した球面成分に対応する波面収差Sのマップ500、非点収差(乱視成分)に対応する波面収差Cのマップ510、コマ収差マップ525、矢状収差マップ530、3次球面収差マップ540、5次非点収差マップ550、5次球面収差マップ560、残余収差マップ570がそれぞれ表示される。なお、ここでの各波面収差の表示形態は、第1の表示例で示した眼の収差マップと同じ形態であり、その詳細な表示は、省略する。

【0094】ここで、図18に戻って説明すると、波面収差Cのマップ510は、3次非点収差の項目607に対応している。この波面収差マップ510の近傍に表示

されている、ゼルニケ収差係数($C=$)、方向($Ax=$)には、項目607に記述されているそれぞれの値が表示される。コマ収差マップ525は、3次コマ収差の項目604に対応している。このコマ収差マップ525の近傍に表示されている、収差係数の平均2乗誤差($RMS=$)、方向($Ax=$)には、項目604に記述されているそれぞれの値が表示される。矢状収差マップ530は、矢状収差の項目605に対応している。この矢状収差マップ530の近傍に表示されている、収差係数の平均2乗誤差($RMS=$)、方向($Ax=$)には、項目605に記述されているそれぞれの値が表示される。3次球面収差マップ540は、3次球面収差の項目601に対応している。この3次球面収差マップ540の近傍に表示されている、収差係数の平均2乗誤差($RMS=$)には、項目601に記述されている値が表示される。

【0095】5次非点収差マップ550は、5次非点収差の項目608に対応している。この5次非点収差マップ550の近傍に表示されている、収差係数の平均2乗誤差($RMS=$)、方向($Ax=$)には、項目608に記述されているそれぞれの値が表示される。5次球面収差マップ560は、5次球面収差の項目602に対応している。この5次球面収差マップ560の近傍に表示されている、収差係数の平均2乗誤差($RMS=$)には、項目602に記述されている値が表示される。残余収差マップ570は、高次収差として利用したゼルニケ多項式の各項以外の項(具体的には、 $Z_{4,0}$ 、 $Z_{4,4}$ 、 $Z_{6,0}$ 、 $Z_{6,1}$ 、 $Z_{6,2}$ 、 $Z_{6,3}$ 、 $Z_{6,4}$ 、 $Z_{6,5}$ 、 $Z_{8,0}$ 、 $Z_{8,1}$ 、 $Z_{8,2}$ 、 $Z_{8,4}$ 、 $Z_{8,5}$ 、 $Z_{10,0}$ 等)による収差の総和を意味する。

【0096】(第8の表示例)図17は、表示部230にグラフィック表示される第8の表示例を示す説明図である。表示部230は、眼の収差と角膜の各収差を選択的に表示するものであって、例えば、表示部230の上段には、ハルトマン像300、全収差マップ315、乱視+高次収差マップ580、高次収差マップ316が表示され、下段には、球面収差(各次数を含む)585、コマ収差(各次数を含む)590、高次非点収差(但し、乱視成分を除く)595、矢状収差マップ530が表示される。乱視+高次収差マップ580は、例えば、第5の表示例で示した高次収差マップ316と、第6の表示例で示した乱視成分に対応する波面収差のマップ510とに基づいて表示される。球面収差585は、例えば、上述した次数の各球面収差に基づいて表示される。コマ収差590は、例えば、上述した次数の各コマ収差に基づいて表示される。高次非点収差595は、例えば、上述した次数の各高次非点収差に基づいて表示される(但し、乱数成分に対応する3次非点収差は除く)。

【0097】(第9の表示例)図21は、表示部230にグラフィック表示される第9の表示例を示す説明図で

ある。第1表示例として示した図5又は第2表示例として示した図8中のMTF表示などの代わりに、又はこれに追加して表示することができる表示態様を示す。図21左側には、被測定眼60の光学特性を示すPSFを等高線により平面上に示した図を配置し、右側には、MTFを等高線により平面的に示した図を配置している。それらの横には、いわゆるStrehl比の数値データが表示されている。ここで示した平面上のPSFの図は、Strehl比で規格化して表示されている。さらにその下側には、測定した光学特性により観察されると推定される異なる数種類の視力に対応したランドルト環の見え方が、視力値の数字とともに表示される。これら3種類の表示形態を同時に観察できるため、迅速かつ確かな判断が可能となる。

(第10の表示例) 図22は、表示部230にグラフィック表示される第10の表示例を示す説明図である。第1表示例として示した図5又は第2表示例として示した図8中のMTF表示などの代わりに、又はこれに追加して表示することができる表示態様を示す。図22左側には、被測定眼60の光学特性を示すPSFを等高線により平面上に示した図を下段にそのPSFを立体的に表示した図を上段に配置している。ここで示した平面上のPSFの図は、Strehl比で規格化して表示されている。さらに、その右側には、被測定眼60の光学特性を示すMTFを二次元又は所定の軸方向の断面、又は、x方向、y方向及びその平均のいずれか又は複数(例えば、3つ)の断面で示した図、を上段に、等高線により平面的に示した図を下段に配置している。それらの横には、いわゆるStrehl比の数値データが表示されている。一番右側には、測定した光学特性により観察されると推定される異なる数種類の視力に対応したランドルト環の見え方が視力値の数字とともに表示される。これら3種類の表示形態を同時に観察できるため、迅速かつ確かな判断が可能となる。このように、本実施の形態による光学特性測定装置100では、例えば、複数の条件下で求めた測定データ(測定結果)、測定結果に対応する画像データ及び/又は数値データを、必要に応じてまとめて、又は、選択的に、表示部230上にグラフィック表示することができる。なお、上述の各表示例で示したハルトマン像や収差図には、すべて前眼部像、解析に用いることのできたスポット重心位置、このスポット重心位置に対応する参照格子点を、それぞれ重ね合わせて表示することもできる。

【0098】

【発明の効果】本発明によると、以上説明した通り、複数の条件下で求めた測定データ(測定結果)、測定結果に対応する画像データ及び/又は数値データをまとめて、又は、選択的に表示することができる。また、本発明によると、被測定眼の全体、角膜、眼内に対して、測定データ(測定結果)、測定結果に対応する画像データ

及び/又は数値データをまとめて、又は、選択的にそれぞれ表示することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に関する光学特性測定装置100の概略光学系を示す図。

【図2】本発明に関する光学特性測定装置100の電気的構成を示す電気系ブロック図。

【図3】本発明に関する光学特性測定装置100のフローチャート。

【図4】ランドルト環の表示に関するフローチャート。

【図5】表示部230にグラフィック表示される第1の表示例を示す説明図。

【図6】第1の表示例に対する変形例を示す説明図(1)、(2)。

【図7】第1の表示例に対する変形例を示す説明図(3)。

【図8】表示部230にグラフィック表示される第2の表示例を示す説明図。

【図9】表示部230にグラフィック表示される第3の表示例を示す説明図。

【図10】表示部230にグラフィック表示される第4の表示例を示す説明図。

【図11】第4の表示例に対する変形例を示す説明図。

【図12】角膜収差測定を示すフローチャート。

【図13】表示部230にグラフィック表示される第5の表示例を示す説明図。

【図14】表示部230にグラフィック表示される第6の表示例を示す説明図。

【図15】第6の表示例に対する変形例を示す説明図。

【図16】表示部230にグラフィック表示される第7の表示例を示す説明図。

【図17】表示部230にグラフィック表示される第8の表示例を示す説明図。

【図18】ゼルニケ係数 C_i による各収差の表現形式600を示す図。

【図19】ゼルニケの多項式 Z_i の極座標表示による収差への分類を示す図(1)。

【図20】ゼルニケの多項式 Z_i のXY座標表示による収差への分類を示す図(2)。

【図21】表示部230にグラフィック表示される第9の表示例を示す説明図。

【図22】表示部230にグラフィック表示される第10の表示例を示す説明図。

【符号の説明】

10 第1照明光学系

11、31、51、55 第1~4光源部

12、32、34、44、52、53 集光レンズ

20 第1受光光学系

21 コリメートレンズ

22 ハルトマン板

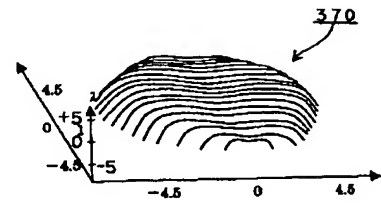
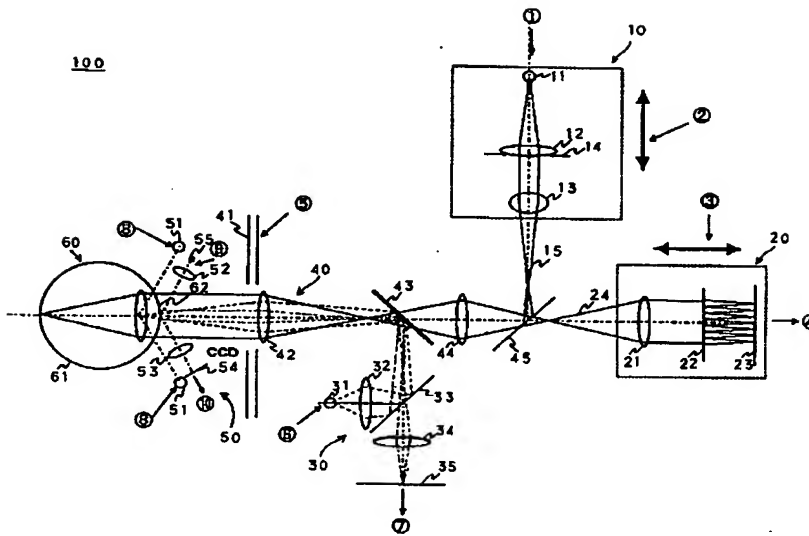
23、35、54 第1〜3受光部
 30 送受光光学系
 33、43、45 ビームスプリッター
 40 共通光学系
 41 ブラチドリング

* 42 アフォーカルレンズ
 50 調整用光学系
 60 被測定眼
 100 光学特性測定装置

*

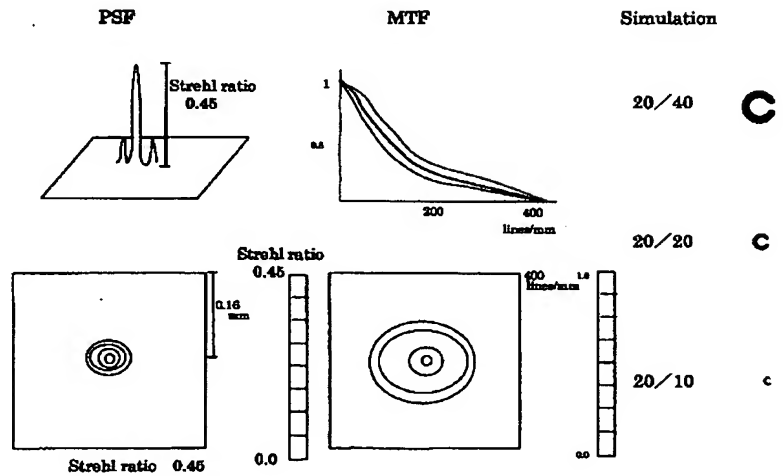
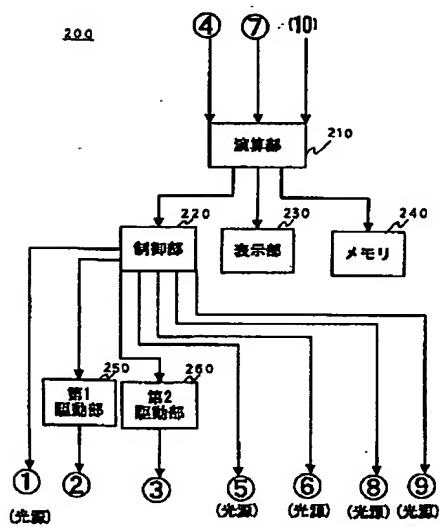
【図1】

【図7】

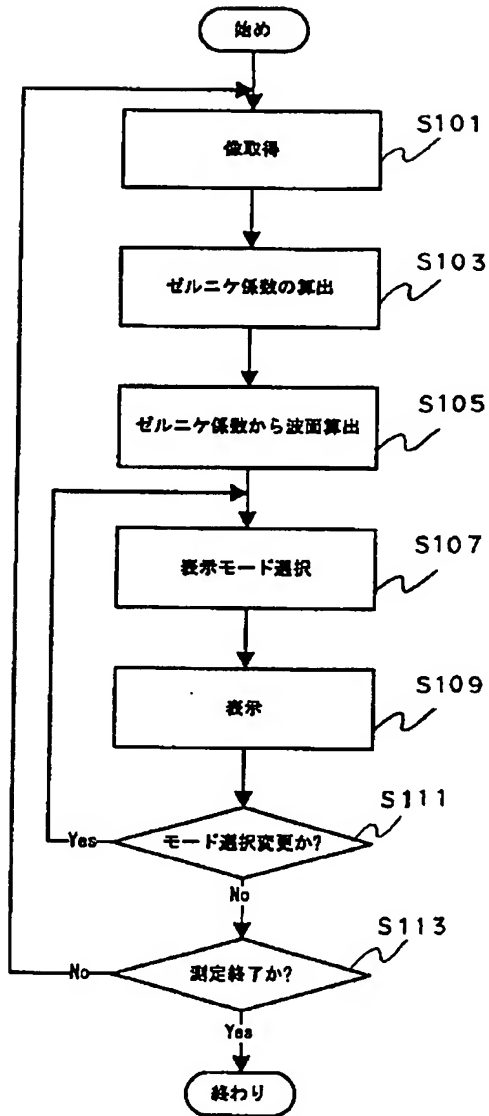


【図2】

【図22】



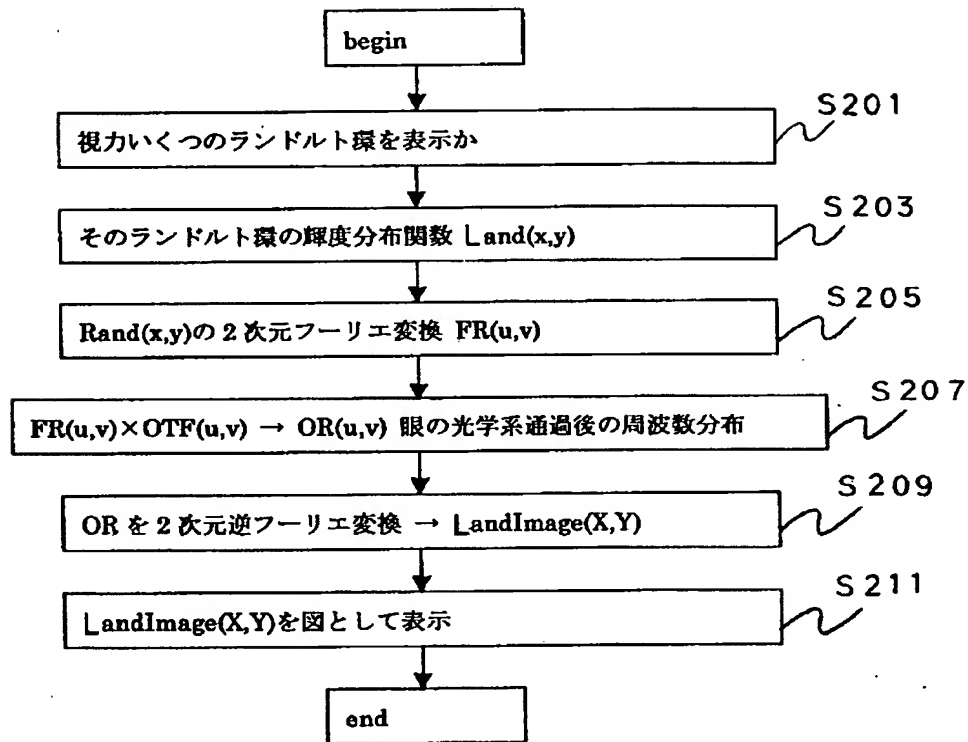
【図3】



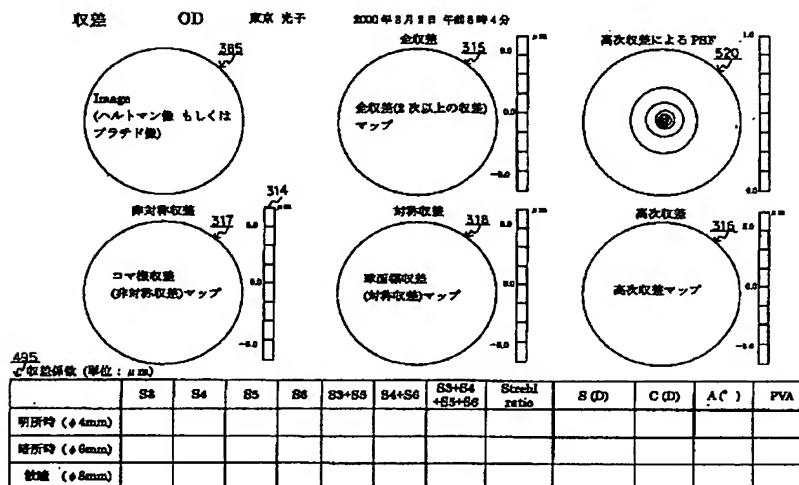
【図19】

i	j	
0	0	1
1	0	$r \sin(t)$
1	1	$\cos(t) r$
2	0	$r^2 \sin(2t)$
2	1	$2r^2 - 1$
2	2	$r^2 \cos(2t)$
3	0	$r^3 \sin(3t)$
3	1	$(3r^3 - 2r) \sin(t)$
3	2	$(3r^3 - 2r) \cos(t)$
3	3	$r^3 \cos(3t)$
4	0	$r^4 \sin(4t)$
4	1	$(4r^4 - 3r^2) \sin(2t)$
4	2	$6r^4 - 6r^2 + 1$
4	3	$(4r^4 - 3r^2) \cos(2t)$
4	4	$r^4 \cos(4t)$
5	0	$r^5 \sin(5t)$
5	1	$(5r^5 - 4r^3) \sin(3t)$
5	2	$(10r^5 - 12r^3 + 3r) \sin(t)$
5	3	$(10r^5 - 12r^3 + 3r) \cos(t)$
5	4	$(5r^5 - 4r^3) \cos(3t)$
5	5	$r^5 \cos(5t)$
6	0	$r^6 \sin(6t)$
6	1	$(6r^6 - 5r^4) \sin(4t)$
6	2	$(15r^6 - 20r^4 + 6r^2) \sin(2t)$
6	3	$20r^6 - 30r^4 + 12r^2 - 1$
6	4	$(15r^6 - 20r^4 + 6r^2) \cos(2t)$
6	5	$(6r^6 - 5r^4) \cos(4t)$
6	6	$r^6 \cos(6t)$

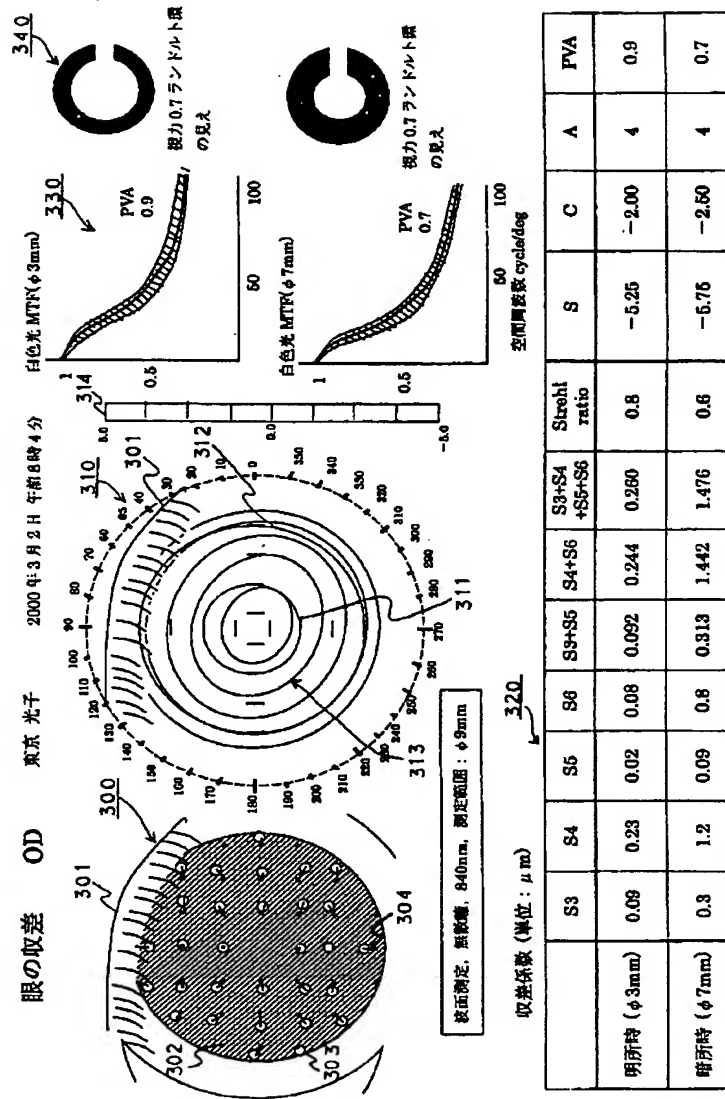
【図 4】



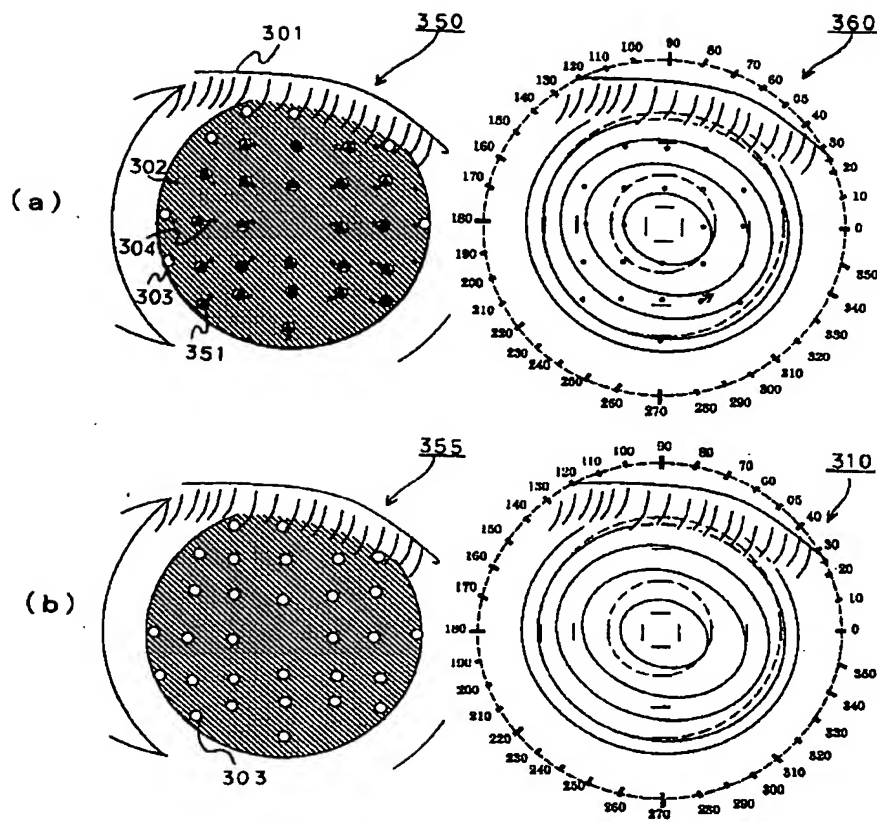
【圖 15】



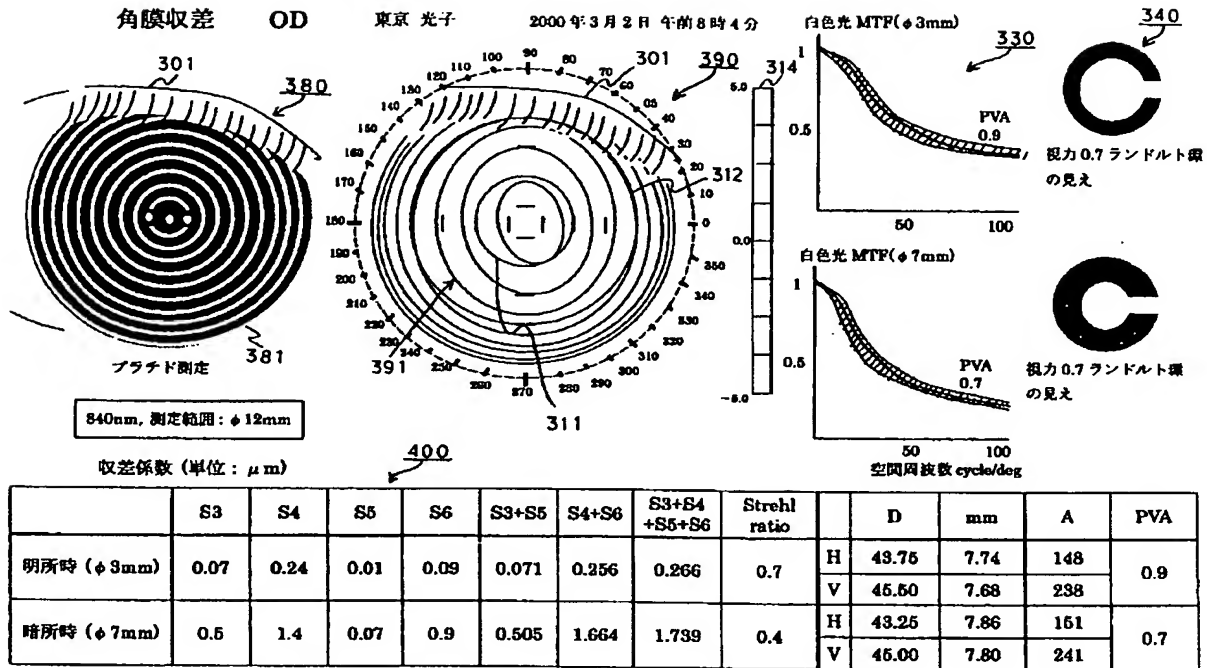
【図5】



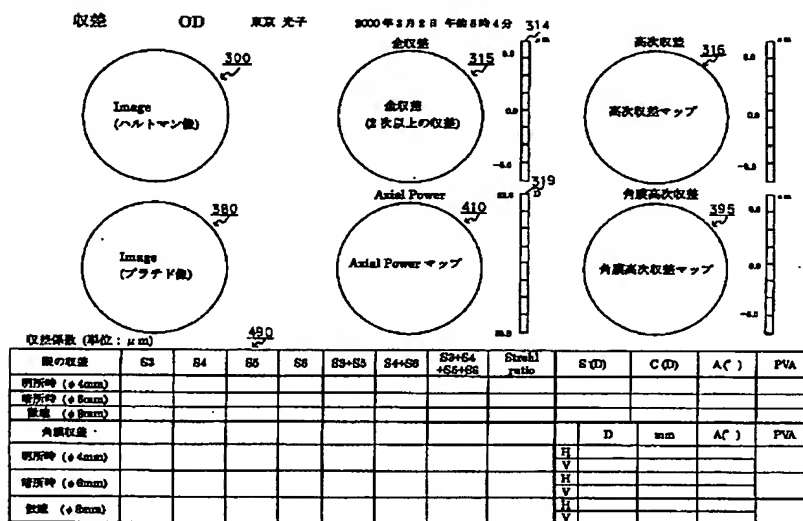
【図6】



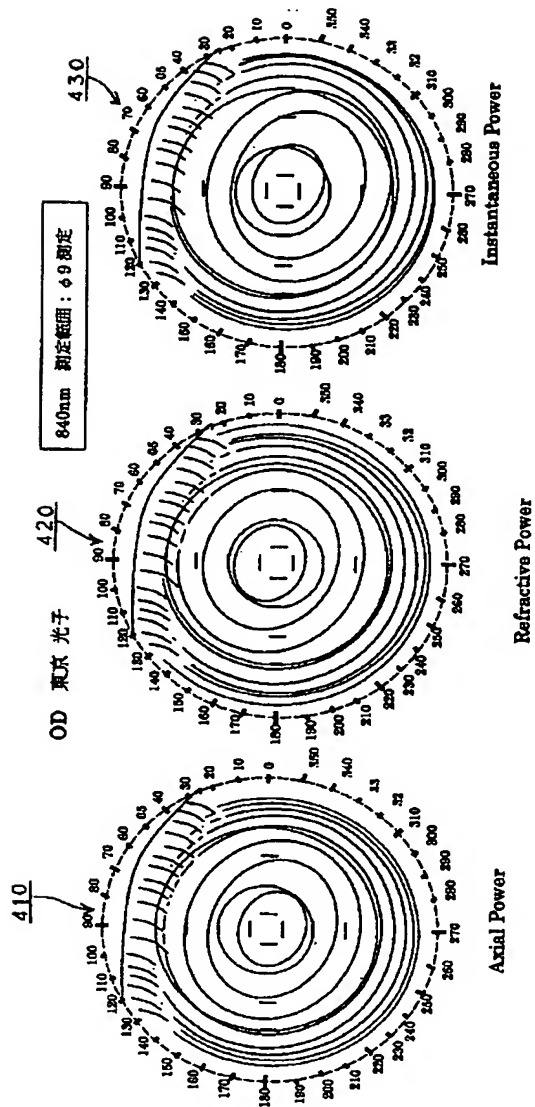
【図8】



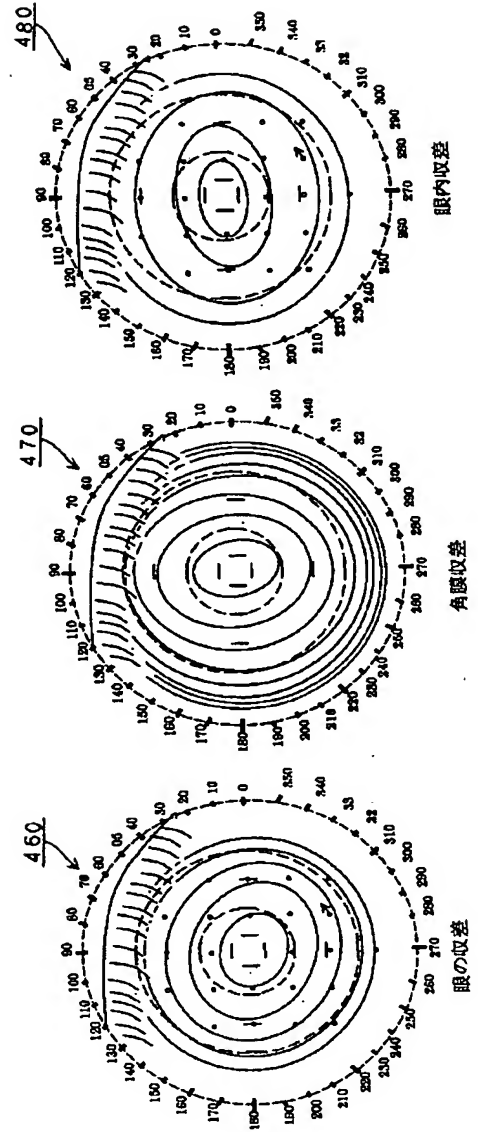
【図13】



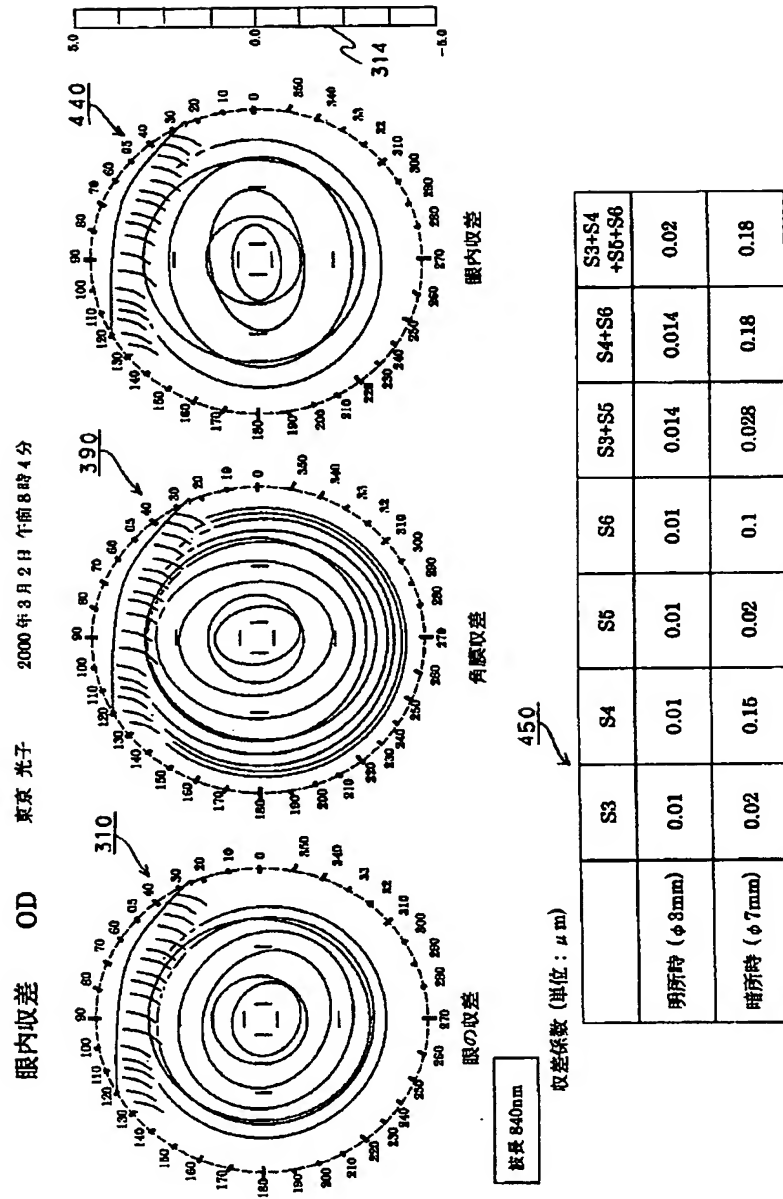
【図9】



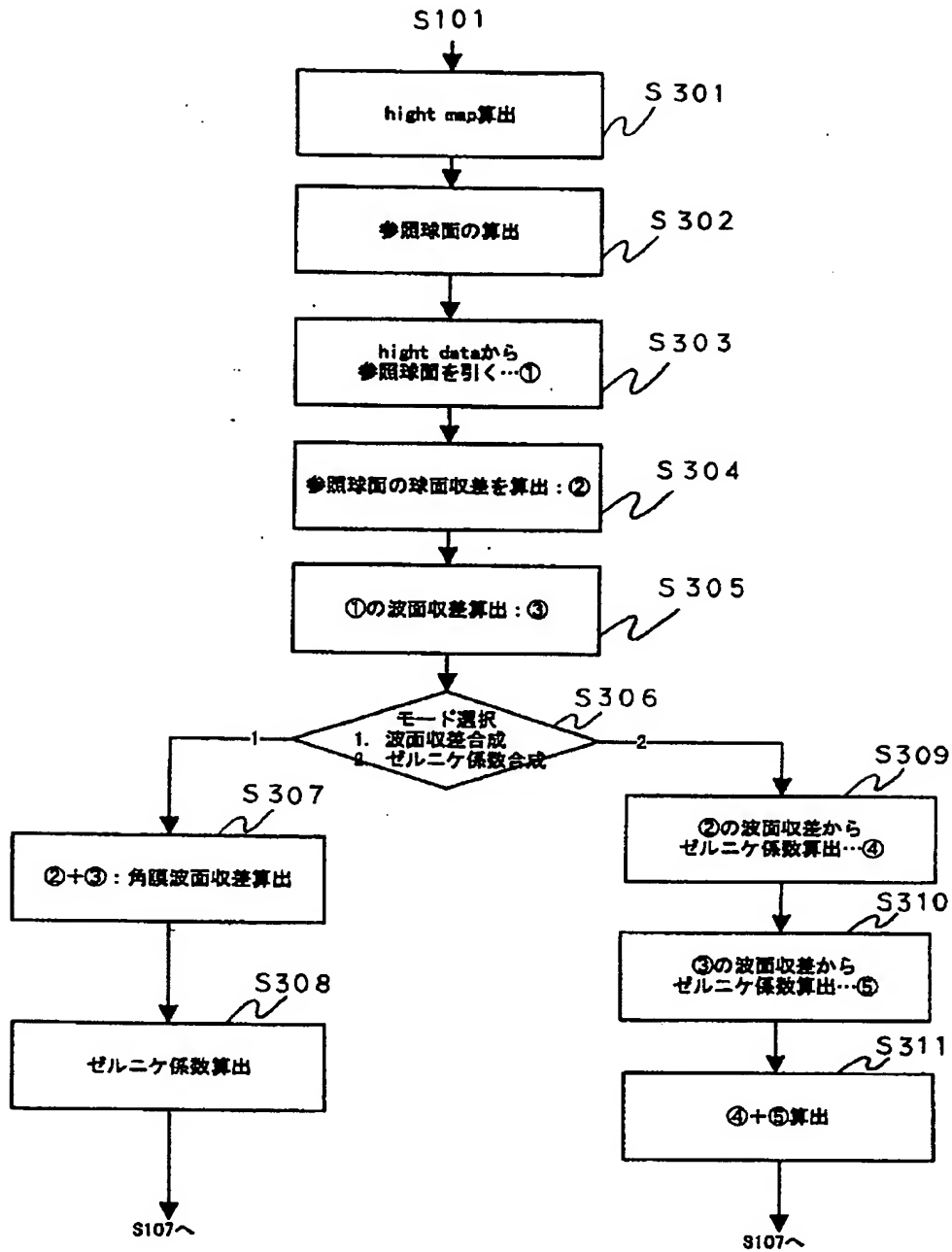
【図11】



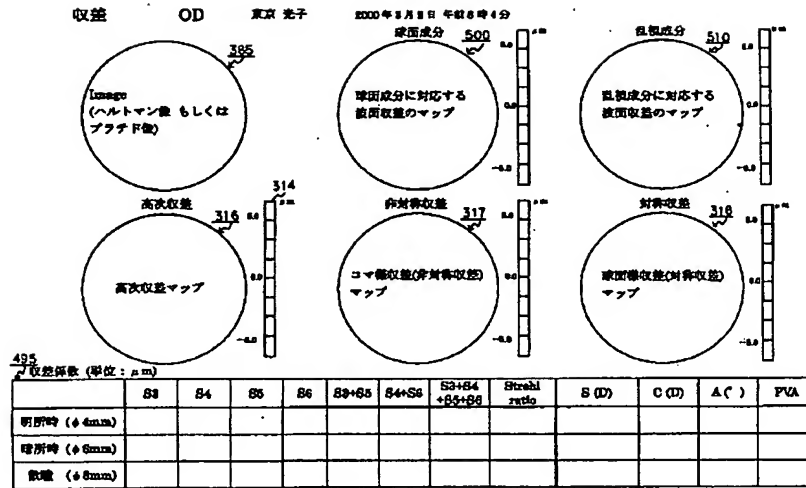
【図10】



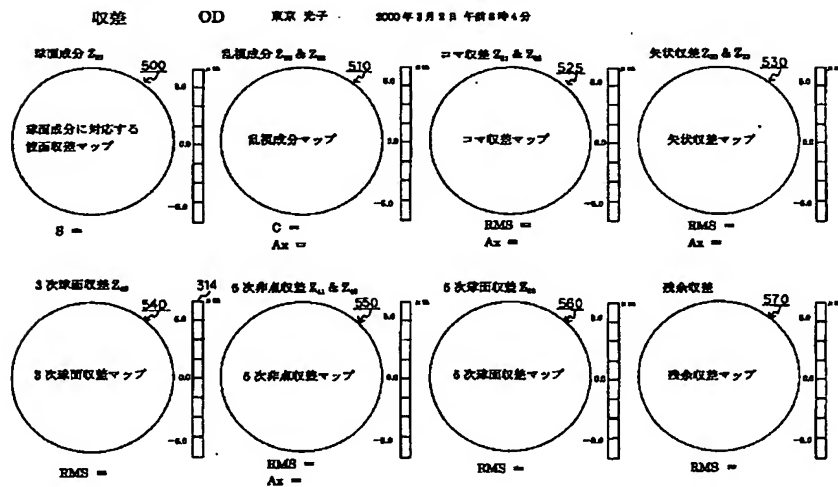
【図12】



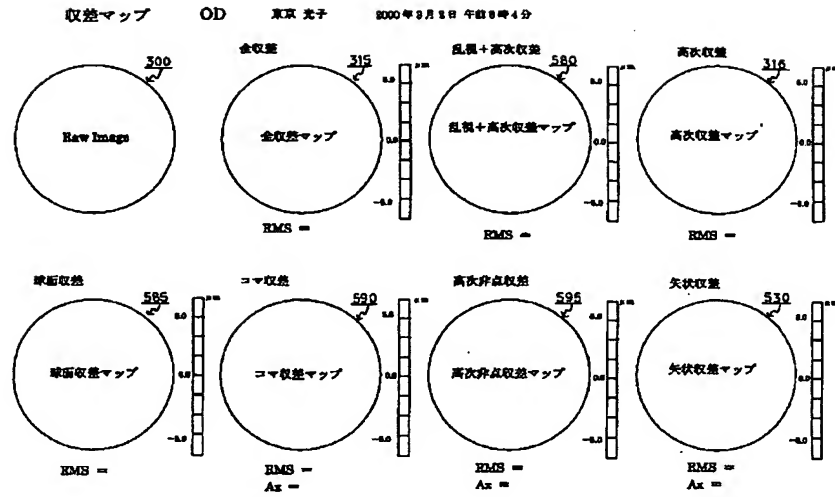
【図14】



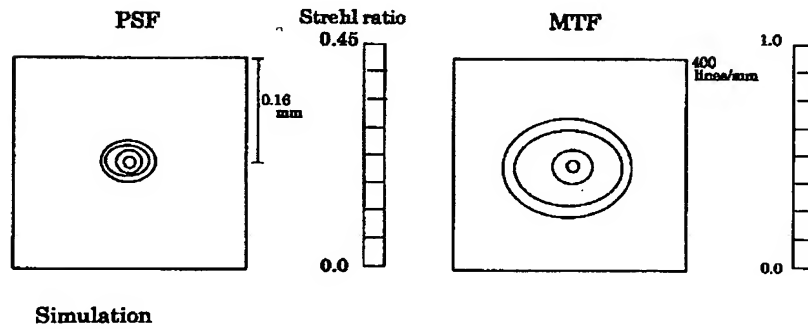
【図16】



【図17】



【図21】



20/40



20/20



20/10

【図18】

600

	名称	ゼルニケ収差係数	方向 Ax (x 軸から ccw)	RMS の平方
601	3 次球面収差	C_{42}		$\frac{1}{5} C_{42}^2$
602	5 次球面収差	C_{63}		$\frac{1}{7} C_{63}^2$
603	7 次球面収差	C_{84}		$\frac{1}{3} C_{84}^2$
604	3 次コマ収差	$\sqrt{C_{31}^2 + C_{32}^2}$	$\tan^{-1} \left(-\frac{C_{31}}{C_{32}} \right) + 90^\circ$	$\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{C_{31}^2 + C_{32}^2}$
605	矢状収差	$\sqrt{C_{30}^2 + C_{33}^2}$	$\frac{1}{3} \tan^{-1} \left(-\frac{C_{30}}{C_{33}} \right) + 90^\circ$	$\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{C_{30}^2 + C_{33}^2}$
606	5 次コマ収差	$\sqrt{C_{52}^2 + C_{53}^2}$	$\tan^{-1} \left(-\frac{C_{52}}{C_{53}} \right) + 90^\circ$	$\frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{C_{52}^2 + C_{53}^2}$
607	3 次非点収差	$\sqrt{C_{20}^2 + C_{22}^2}$	$\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{C_{20}}{C_{22}} \right) + 90^\circ$	$\frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{C_{20}^2 + C_{22}^2}$
608	5 次非点収差	$\sqrt{C_{41}^2 + C_{43}^2}$	$\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{C_{41}}{C_{43}} \right) + 90^\circ$	$\frac{1}{\sqrt{10}} \sqrt{C_{41}^2 + C_{43}^2}$

〔図20〕

i	j	
0	0	1
1	0	y
1	1	x
2	0	$2yx$
2	1	$2x^2 + 2y^2 - 1$
2	2	$x^2 - y^2$
3	0	$3yx^2 - y^3$
3	1	$3yx^2 + 3y^3 - 2y$
3	2	$3x^3 + 3xy^2 - 2x$
3	3	$x^3 - 3xy^2$
4	0	$4yx^3 - 4y^3x$
4	1	$8yx^3 + 8y^3x - 6yx$
4	2	$6x^4 + 12x^2y^2 + 6y^4 - 6x^2 - 6y^2 + 1$
4	3	$4x^4 - 4y^4 - 3x^2 + 3y^2$
4	4	$x^4 - 6x^2y^2 + y^4$
5	0	$5yx^4 - 10y^3x^2 + y^5$
5	1	$15yx^4 + 10y^3x^2 - 5y^5 - 12yx^2 + 4y^3$
5	2	$10yx^4 + 20y^3x^2 + 10y^5 - 12yx^2 - 12y^3 + 3y$
5	3	$10x^5 + 20x^3y^2 + 10xy^4 - 12x^3 - 12xy^2 + 3x$
5	4	$5x^5 - 10x^3y^2 - 15xy^4 - 4x^3 + 12xy^2$
5	5	$x^5 - 10x^3y^2 + 5xy^4$
6	0	$6yx^5 - 20y^3x^3 + 6y^5x$
6	1	$24yx^5 - 24y^5x - 20yx^3 + 20y^3x$
6	2	$30yx^5 + 60y^3x^3 + 30y^5x - 40yx^3 - 40y^3x + 12yx$
6	3	$20x^6 + 60x^4y^2 + 60x^2y^4 + 20y^6 - 30x^4 - 60x^2y^2 - 30y^4 + 12x^2 + 12y^2 - 1$
6	4	$15x^6 + 15x^4y^2 - 15x^2y^4 - 15y^6 - 20x^4 + 20y^4 + 6x^2 - 6y^2$
6	5	$6x^6 - 30x^4y^2 - 30x^2y^4 + 6y^6 - 5x^4 + 30x^2y^2 - 5y^4$
6	6	$x^6 - 15x^4y^2 + 15x^2y^4 - y^6$